



Direction du Laboratoire
des Chaussées

SYNTHÈSE DES OUTILS DE MODÉLISATION DE CHAUSSÉES ACTUELLEMENT DISPONIBLES AU LCPC

Opération de recherche 11P063

« Outils avancés de calcul et de dimensionnement des structures de chaussées »

Par :

Denis ST-LAURENT, ing.

Division Structures et Matériaux pour
les Infrastructures de Transport (SMIT)

Le 5 juin 2008

LCPC **Etablissement Public national à caractère Scientifique et Technologique**
Paris 58 boulevard Lefebvre - 75732 Paris cedex 15
Nantes Route de Bouaye - BP 4129 - 44341 Bouguenais cedex
Marne-la-Vallée LMSGC - Cité Descartes, Parc Club de la Haute Maison
2 allée Kepler - 77420 Champs-sur-Marne
Satory LIVIC - Batiment 140 - 13 route de la Minière - Satory - 78000 Versailles
Internet www.lcpc.fr

AVANT PROPOS

Ce document a été préparé à la demande de Chantal de La Roche, au cours de mon séjour à la division SMIT du centre LCPC de Nantes, dans le cadre du programme franco-québécois d'échange de fonctionnaires.

Il convient de mentionner que j'ai fait l'exercice en tant qu'observateur et utilisateur, n'étant l'auteur d'aucun des outils qui y sont décrits. Ce rapport a été rédigé sur la foi des renseignements communiqués par leurs auteurs respectifs. Les avis émis reflètent ma compréhension, construite à partir des informations reçues, ainsi que mon contexte professionnel de québécois en mission. Ils sont énoncés à titre indicatif, sans prétention de substitution par rapport aux objectifs ou priorités projetés par les différents chargés de recherche de la division.

Je tiens à remercier tout le personnel de la division SMIT pour leur esprit de collaboration ainsi que pour leur accueil chaleureux et leur aide amicale. Merci à Pierre Hornych pour l'accueil et l'aide qu'il a assurée dès mon premier appel téléphonique, et à Jean-Michel Piau pour les enseignements qu'il m'a transmis généreusement. Mon séjour serait aussi nettement moins riche sans le précieux concours que j'ai reçu de Jean-Maurice Balay, Didier Bodin, Armelle Chabot, Ferhat Hammoum et Emmanuel Chailleux. Merci aussi à Chantal de La Roche pour son support et sa confiance, ainsi qu'à tout le personnel de la division, thésards et chercheurs de passage qui contribuent à la cohésion d'ensemble et au maintient d'une belle ambiance de travail.

Je n'oublie pas aussi les intervenants du Ministère des Transports du Québec qui m'ont donné la chance de vivre cet échange, enrichissant pour moi et ma famille. Je remercie en particulier Anne-Marie Leclerc, Claude Tremblay, Guy Tremblay et Guy Bergeron qui m'ont accordé leur confiance et les dispositions nécessaires à la réalisation de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

1) Introduction

La division Structures et Matériaux pour les Infrastructures de Transport (SMIT) utilise plusieurs de ses résultats de recherche pour le développement d'outils destinés au dimensionnement et à l'analyse des chaussées. Le présent document décrit les principaux logiciels actuels afin de fournir un portrait général et un bilan factuel de ce qui est disponible ou en cours de développement au sein de la division.

Les outils liés au dimensionnement et à l'analyse du comportement des chaussées et matériaux de chaussées sont variés en ce sens qu'ils peuvent prendre la forme d'équations, courbes, tableaux, logiciels, guides, normes, publications, notes et logiciels reflétant l'ensemble des connaissances acquises dans ce domaine, sans oublier les divers appareils et méthodes de mesure, d'essai ou d'auscultation destinés au laboratoire et au terrain.

Le *Catalogue des structures type de chaussées neuves* (SETRA-LCPC, 1998) constitue l'outil le plus utilisé dans la pratique courante du dimensionnement tandis que le Guide technique *Conception et dimensionnement des structures de chaussées* (SETRA-LCPC, 1994) en est la principale référence. Le présent document se limite principalement aux logiciels de simulation se situant un peu plus en amont de la chaîne, et spécifiquement destinés au calcul des structures de chaussées, en l'occurrence les logiciels ALIZÉ-LCPC, CASTEM, CESAR-LCPC (notamment les modules LINE, TACT, DECO, CVCR, ORNI), FISSUROUTE, VISCOROUTE, ZÉPHYR. D'autres outils sont mentionnés au passage lorsqu'ils gravitent tout près de façon complémentaire : LICESAR, PREDICTA, VISCOANALYSE. Il est important en particulier pour les activités de la division de disposer également d'outils numériques susceptibles d'aider à l'interprétation des essais de laboratoire et à l'identification des lois de comportement des matériaux de chaussée.

Cette note ne constitue pas un recensement ni une description exhaustive des outils ou projets de la Division, mais plutôt une synthèse des logiciels ayant le plus retenu mon attention. Il s'agit d'un portrait très ponctuel pour ces outils qui sont conduits à évoluer dans le temps.

Les outils de calcul structurel ont plusieurs points communs, mais aussi des différences qui s'expliquent par leur façon de représenter la charge, la structure, les matériaux et les interfaces entre les couches. Ces différences permettent d'élargir la diversité des problèmes que l'on peut résoudre, tout en pondérant le compromis inévitable entre le réalisme et la complexité ou temps de calcul. Leurs caractéristiques sont énumérées dans le Tableau 1 et décrites sommairement dans ce qui suit. Les considérations générales de la section 2 ont pour but d'aider le lecteur profane à mieux comprendre la description individuelle des logiciels effectuée dans la section 3, de même que certains des enjeux qui y sont liés spécifiquement. La conclusion résume les perspectives de façon générale. Les fiches individuelles produites par leurs auteurs sont jointes en annexe lorsque disponibles. Les guides, rapports et publications plus détaillés sont listés à la fin du document pour fins de référence.

Tableau 1 : Logiciels de calcul structurels, synthèse des spécificités

	ALIZÉ – LCPC	VISCOROUTE	(FISSUROUTE)	STANDARD - LINE, TACT, DYNI	EXPERT - CVCR	RECHERCHE - ORNI
				CESAR-LCPC		
Charge statique (essai de plaque ou Benkelman)	X		X	X		
Charge roulante (camion lourd)		X			3D	3D
Charge transitoire (essai FWD)				X		
Charge à empreinte circulaire	X	(v2)	X	2D	2D	2D
Charge à empreinte rectangulaire	a	X	X	3D	3D	3D
Charge à empreinte elliptique		(v2)				
Charge à empreintes multiples	X	(v2)	X	3D	3D	3D
Charge avec composantes horizontales	p	X	X	X	X	X
Charge avec pression non uniforme	a	(v3)	X	X	X	X
Contrainte de retrait (thermique)			X	X	X	X
Structure représentée en 2D axisymétrique	X			X	X	
Structure représentée en 3D		X	X	X	X	X
Structure sur massif uniforme semi-infini (simplification théorique)	X	X	X			
Structure horizontalement uniforme[1] et infinie (simplification théorique)	X	X				
Structure avec discontinuités (joints, fissures)			X	X	X	X
Structure à géométrie quelconque et finie (éprouvette de laboratoire, bord limité par tranchée ou talus, présence de rails…)			X	X	X	X
Matériaux élastiques linéaires isotropes	X	X	X	X	X	X
Matériaux thermo-viscoélastiques (Huet-Sayegh)		X			3D	3D
Matériaux non-linéaires (Boyce, K-theta…)					X	X
Matériaux anisotropes (élasticité linéaire ou non linéaire…)				X	X	X
Matériaux élastoplastiques (déformations permanentes)						X
Interface de couches collées	X	X	X	X	X	X
Interface de couches glissantes	X	(v3)	X	X	X	X
Interface de couches avec paramètre de frottement	p	(v3)	X	X	X	X
Intégration d'une bibliothèque de paramètres matériaux	X					
Intégration d'une bibliothèque d'empreintes de chargement	X					
Intégration dans la méthode de dimensionnement standard	X					
Intégration d'effets climatiques	(X)					
Intégration avec des outils d'expertise (rétrocalcul, cumul de dommages, etc.)	(X)					

Notes: les identifiants entre parenthèses renvoient au projet d'une future version ou d'une version de recherche. La lettre « a » indique l'ajout d'une solution approchée. L'indication 2D/3D réfère au mode admissible de représentation de la structure lorsque des restrictions s'appliquent. La lettre « p » indique une possibilité envisageable.

[1] En termes de géométrie et de loi de comportement des matériaux.

2) Considérations générales en mécanique des chaussées

La mécanique des chaussées vise à comprendre le comportement des chaussées et de leurs matériaux afin d'éclairer plusieurs décisions reliées à leur conception, construction, entretien et exploitation. Il convient de faire la différence entre un calcul standard et l'expertise d'un cas inédit ou hors norme, de même qu'entre le dimensionnement d'une chaussée neuve, l'analyse d'une chaussée existante et l'interprétation d'une expérimentation ou étude de laboratoire. Tous ces travaux sont néanmoins sujets à un ensemble de connaissances communes en mécanique des chaussées. Ils nécessitent l’usage d’outils appropriés pouvant prendre la forme d’équations, courbes, tableaux, logiciels, guides ou normes.

À la base, les fondements sont souvent les mêmes : Les logiciels et autres méthodes de calcul se basent essentiellement sur des calculs d’endommagement ou de durée de vie en passant préalablement par des calculs de sollicitation interne (contraintes, déformations, déplacements) tenant compte des sollicitations externes, des matériaux, des structures et d'un certain nombre de variables contextuelles (température, humidité, confinement, contraintes initiales, etc.).

Quelques concepts jugés pertinents ou essentiels à la compréhension du reste du présent document sont décrits dans cette section. Ceci permet d’éviter la répétition de faits communs à plus d’un outil et d’expliciter certaines nuances ou interactions sans alourdir les fiches de la section 3.

2.1) Mode de chargement

Les divers modes de sollicitation externe (charge statique, transitoire ou roulante) amènent des effets de vitesse et d’inertie différents dans la chaussée. Les effets cinématiques ne peuvent être pris en compte qu’à travers certains modèles de rhéologie des matériaux, dont la viscoélasticité qui est abordée un peu plus loin.

L’empreinte de contact surfacique d’un pneu sur la chaussée est souvent approchée par un disque à pression uniforme pour simplifier les calculs. L’avantage de cette géométrie est de pouvoir réduire sous certaines conditions le problème tridimensionnel à une formulation bidimensionnelle axisymétrique, en coordonnées cylindriques. Mais ceci amène des imprécisions sachant que l’empreinte réelle d’un pneu peut avoir une géométrie quelconque dont les contours s’approchent davantage d’un rectangle ou d’une ellipse, et que la pression de contact réelle n’est pas forcément uniforme. Les essieux de camions sont aussi munis en général d’un jumelage de pneus, et éventuellement d’un arrangement plus complexe agissant en interaction (essieux en tandem, tridem, trains d’atterrissage aéronautique). Les trains d’atterrissage aéronautique amènent des situations encore plus complexes. L’empreinte de contact utilisée en dimensionnement inclut donc presque toujours au moins deux aires de contact bien distinctes en simultané.

Un véhicule ne peut se mouvoir sans qu'il y ait friction entre la roue et la surface de roulement. Cette friction est souvent négligée dans les calculs structuraux. Elle peut parfois s'avérer plus importante en certains endroits critiques tels que des pentes fortement inclinées ou des zones de virage ou de freinage, et causer des dommages tels que le décollement de couches ou un orniérage prononcé. L'orientation des efforts de surface peut aussi influencer les mécanismes d’endommagement (ex : orniérage) en modifiant les états et chemins de contraintes.

De plus, certains auteurs attribuent en partie la fissuration des revêtements, du haut vers le bas, à la présence d'efforts de tension produits en surface sous l'empreinte de contact des pneus radiaux utilisés avec les camions lourds (effet de Poisson). L'analyse de cette problématique nécessite aussi la prise en compte d'efforts horizontaux. Cette analyse requiert aussi que l'on puisse modéliser des empreintes de charges multiples et de préférence à contours rectangulaires.

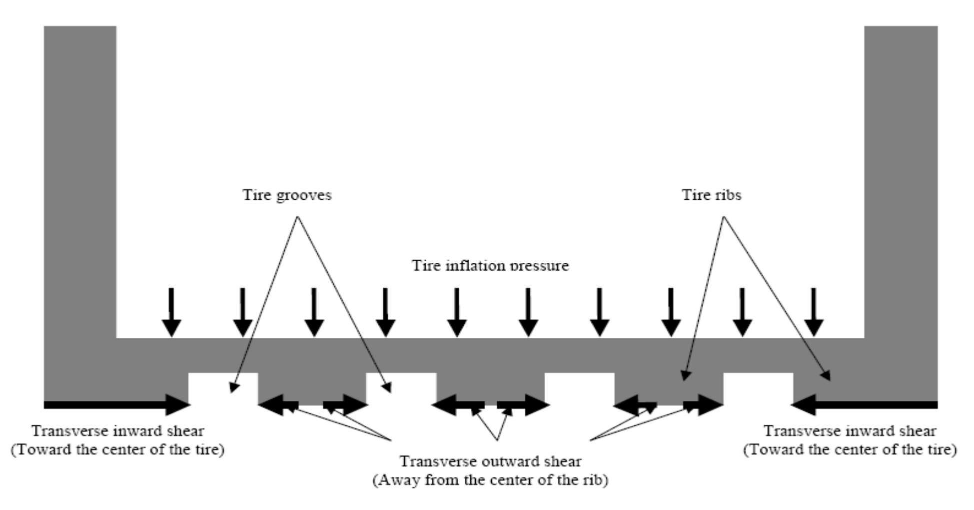


Figure 1 : Détail des contraintes induites au contact d'un pneu (Baladi et al., 2002)

2.2) *Nature et rigidité des matériaux*

La diffusion des sollicitations dans le corps de la chaussée dépend en grande partie de la nature et de la rigidité des matériaux. Cette rigidité est très variable et fait l'objet de plusieurs sujets d'études, considérés en mécanique comme étant préalables aux études d'endommagement (Tableau 2). Les matériaux utilisés en France dans les chaussées sont énumérés dans le guide de *Conception et dimensionnement des structures de chaussées* de 1994, et repris dans le logiciel ALIZÉ. On retrouve principalement les bétons bitumineux ou hydrauliques, ainsi que les matériaux granulaires et sols naturels. Le guide de dimensionnement contient par ailleurs une base de données des paramètres forfaitaires à utiliser dans les calculs, ce qui représente une base de connaissances initiales pour un vaste ensemble de matériaux. Cette base de données est incluse dans le logiciel ALIZÉ. Ces valeurs ont été déterminées essentiellement en vue d'une représentation élastique linéaire isotrope, soit la loi de Hooke caractérisée par un module d'Young (E) et un coefficient de Poisson (υ). Le comportement réel des matériaux est toutefois plus complexe et les approches suivantes permettent de réaliser les simulations avec un réalisme accru.

2.2.1 Rigidité thermo-visco-élastique (E*, υ*) pour les enrobés bitumineux

La prise en compte de la viscoélasticité permet de tenir compte des effets de vitesse et de délai de réponse dans un matériau viscoélastique. Le retard de déformation se produisant dans les matériaux bitumineux viscoélastiques peut être modélisé à l'aide d'un module complexe composé d'une partie réelle et imaginaire ($E^* = E_{réel} + i \cdot E_{imaginaire}$). Ce module complexe varie selon la température et la durée de chargement.

Il est possible de rendre partiellement compte de cette réalité avec un modèle linéaire élastique isotrope. Il s'agit dans ce cas de choisir judicieusement le module d'élasticité en fonction de la température et de la vitesse de sollicitation. La méthode de dimensionnement normalisée (Guides et ALIZÉ) utilise cette simplification et fourni les modules à retenir en fonction de la température pour chaque enrobé normalisé. Cet artifice masque néanmoins des phénomènes viscoélastiques potentiellement significatifs.

La rhéologie viscoélastique peut être représentée selon divers modèles (Maxwell, Kelvin-Voigt, Burger, Burger généralisé, série de Prony…) et c'est celui de Huet Sayegh (1963) qui est principalement retenu en France considérant ses aptitudes à bien représenter les revêtements bitumineux avec un minimum de paramètres. Le modèle de Huet-Sayegh permet de réduire le

nombre d'amortisseurs grâce à l'introduction d'amortisseurs non-linéaires par rapport au temps. Le coefficient de Poisson est jusqu'à maintenant traité comme une constante pour des raisons pratiques, et parce que l'on n'a pas véritablement identifié de situations en laboratoire ou sur chaussées pour lesquelles la prise en compte d'un coefficient de Poisson variable s'avèrerait importante. Les outils de calcul PREDICTA et VISCOANALYSE ont été spécifiquement développés pour représenter le comportement réversible d'un enrobé bitumineux avec le modèle de Huet-Sayegh.

La prise en compte de la viscoélasticité amène des champs de sollicitation plus réalistes, notamment sous le passage d'une charge roulante ou transitoire. Elle permet de rigoureusement tenir compte de la vitesse des véhicules. Elle permet aussi de mettre en évidence des phénomènes que la modélisation élastique ne permet pas de voir. Les impacts suivants ont été notés lors des précédents travaux de validation du logiciel VISCOROUTE :

- Asymétrie entre les champs mécaniques devant et derrière la charge
- Multipics plus fidèles à la réalité : effet de mémoire dans le cas des trains d'essieux multiples, voir Figure 2
- Meilleur classement des contraintes principales transversales vs longitudinales
- Cisaillement accru en bord de charge (potentiel de fissuration par le haut, à explorer)
- Création de contraintes de traction en surface de chaussée derrière le passage d'une charge roulante

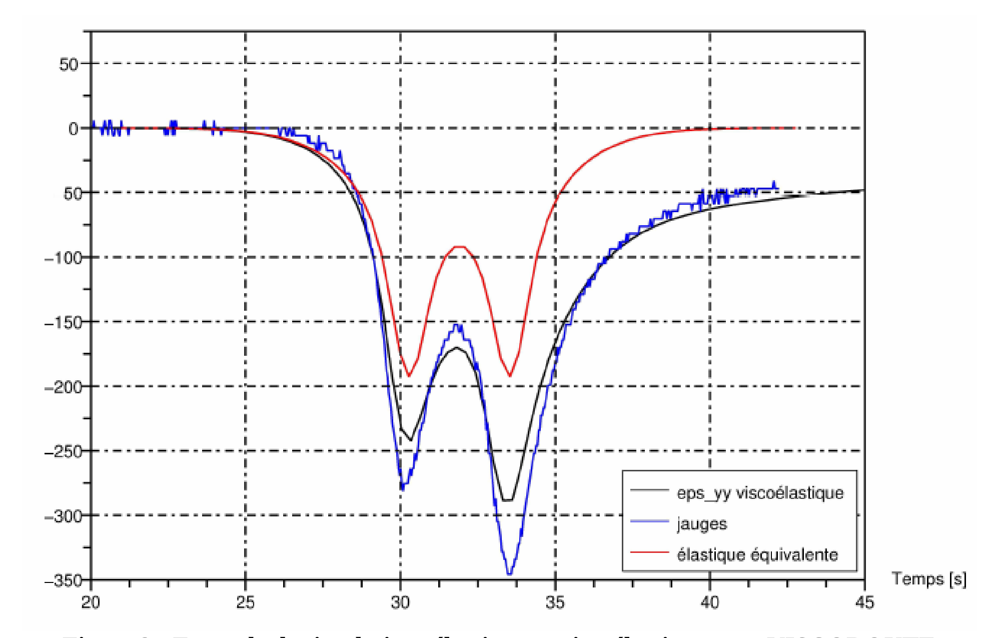


Figure 2 : Exemple de simulations élastique et viscoélastique avec VISCOROUTE
Élongation transversale à la base du revêtement bitumineux lors du passage d'essieux en tandem
La viscoélasticité explique la présence d'une déformation plus élevée sous le second essieu
(réf. : Chabot et al., 2006)

Ces effets sont peu perceptibles pour les structures minces mais importants en présence de structures bitumineuses épaisses. La prise en compte de la viscoélasticité permet aussi de calculer les dissipations d'énergie suite au passage d'une charge. Ceci peut servir par exemple à calculer les effets d'un dimensionnement sur la consommation d'essence des usagers. Certains auteurs avancent aussi que l'énergie dissipée est reliée à l'endommagement de la chaussée, ce qui reste à prouver sachant que la majeure partie se dissipe en chaleur. Les modèle considérés actuellement étant à coefficient de Poisson constant, aucune distinction n'est faite entre les composantes déviatorique et volumique. Le fluage visco-plastique n'est pas inclus.

2.2.2 Élasticité non-linéaire des matériaux non-liés

A faible niveau de déformation (de l'ordre de 10^{-3}) le comportement des matériaux non-liés en compression est de type élastique non linéaire durcissant, en se basant sur la réversibilité et la convexité de la relation contraintes-déformations. Ceci se traduit par un module d'élasticité variable en fonction de l'état de contraintes et défini en première approximation qu'en situation de compression.

Sur le plan structurel, la modélisation non linéaire doit permettre d'obtenir l'équilibre dans la chaussée sans apparition de contraintes de tension trop importantes dans les matériaux non liés, contrairement à ce qu'on obtient avec un modèle linéaire classique. Le problème posé peut ne pas admettre de solution dans certains cas, ce qui pourrait aussi signifier que le dimensionnement considéré est physiquement non acceptable dans le domaine élastique.

La Figure 3 présente un exemple de solution élastique non linéaire illustrant la variation spatiale du module dans une même couche de grave non traitée, située à l'intérieur d'une structure chaussée sollicitée par un essai de plaque.

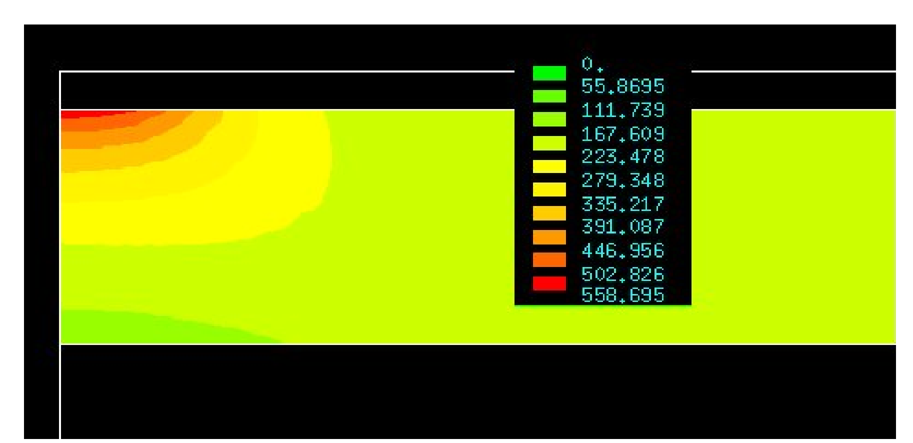


Figure 3 : Exemple de simulation 2D axisymétrique non linéaire avec CESAR-CVCR
Modules sécants d'élasticité dans la couche de GNT (modèle K-theta).

Ce type de comportement est connu depuis longtemps et est à l'origine des règles de subdivision des sous-couches de GNT recommandées dans le logiciel ALIZÉ (tableau V.3.2 du guide de dimensionnement de 1994). Cet artifice permet de tenir compte de la diminution du module de haut en bas des couches de GNT. Les variations horizontales de rigidité ne peuvent par contre être modélisées que par la méthode des éléments finis. Il faut par ailleurs une modélisation tridimensionnelle en présence d'une empreinte de chargement à aire multiple (pneus jumelés), étant donné qu'elle exclut l'applicabilité du principe de superposition des charges.

Il y a eu quelques tentatives inachevées au LCPC pour prendre en compte la non-linéarité dans un code d'éléments finis : logiciels NOEL et module MCHS pour CESAR (Guezouli, 1994). La dernière version à ce jour, le module CVCR pour CESAR, se base sur le modèle hyperélastique de Boyce pour représenter les matériaux non linéaires « durcissants » tels que les graves non traitées et autres matériaux ou sols granulaires. Il a été modifié pour permettre la prise en compte de l'anisotropie (Hornych et al., 1998). Les essais en laboratoire montrent que cette dernière particularité peut être importante bien qu'on ne sache pas comment la mesurer sur le terrain. Les paramètres du modèle de Boyce peuvent se déterminer à partir d'essais triaxiaux cycliques normalisés. Le modèle K-theta est aussi prévu dans CVCR, principalement pour permettre la liaison avec la littérature internationale.

Des modèles d'orniérage des chaussées sont en cours de développement. Certains concernent

l'orniérage des couches de GNT. Il faudra veiller à assurer leur compatibilité avec les états de contrainte autorisés par les modèles retenus dans CVCR. Des difficultés peuvent notamment apparaître en présence de ratio q/p élevés au voisinage de $p = 0$,

La possibilité de prendre explicitement en compte une pression capillaire dans les GNT a été introduite dans les modèles non linéaires, ce qui permet d'admettre de petits efforts en tension.

Une autre problématique importante réside dans les extrapolations faites au cours d'un calcul de chaussée car on retrouve alors des portions de la GNT soumis à des états de contraintes inaccessibles par les essais de laboratoire (essai triaxial cyclique). Le modèle de Boyce par exemple soulève certaines questions fondamentales parce qu'il présente une asymptote, lorsque le rapport des invariants de contrainte q/p est élevé, conduisant vers des modules de rigidité et coefficients de Poisson débordant des plages de valeurs généralement admises en pratique (Figure 4). Cette problématique est en cours d'étude, à partir de la thèse de Coulibaly (1998) et des principes de la Thermodynamique. Il faut noter que les ratios q/p élevés se cantonnent *a priori* au voisinage des états de contrainte de faible intensité, ce qui limite peut être leur impact. La compatibilité avec les modèles d'orniérage devra néanmoins être étudiée.

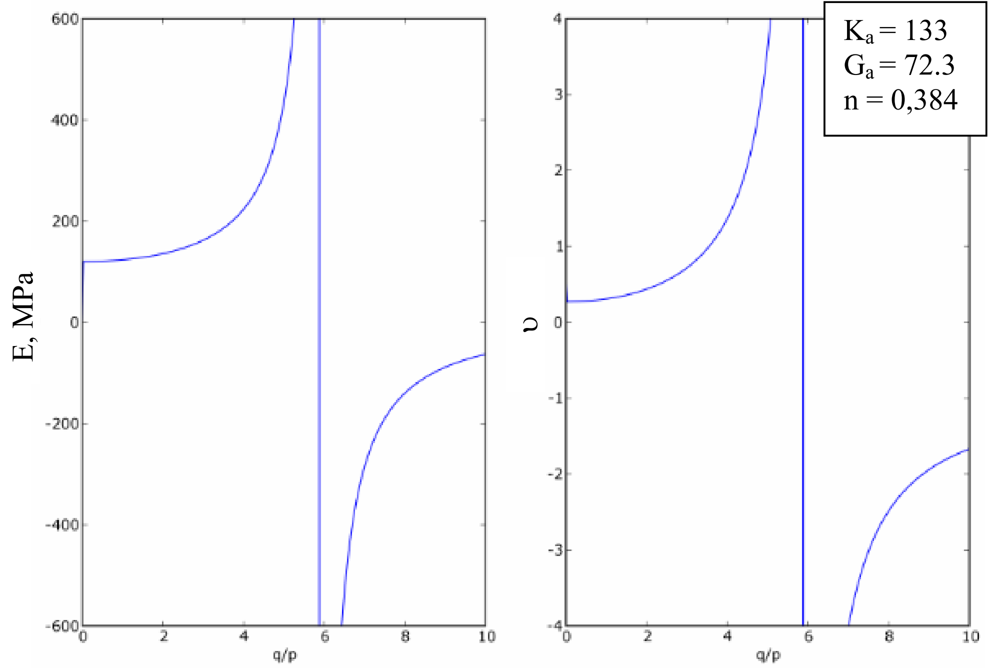


Figure 4 : Modèle de Boyce, problématique de l'extrapolation asymptotique
(Les essais triaxiaux servant au calage du modèle sont en général limités à q/p ≤ 2)

On note aussi l'absence d'utilisation au sein de la division de modèles non linéaires pour les matériaux « adoucissants », tels que les sols fins. Leur absence pourrait s'expliquer par l'importance des couches de forme granulaires et dans une certaine mesure par l'utilisation d'essais sur sols essentiellement in situ et limités à un unique niveau de chargement. Le modèle d'Uzan (Équation 1) est recommandé comme point de départ pour tenir compte de matériaux adoucissants. Cette dernière relation est aussi hyperélastique, à la condition d'introduire un coefficient de Poisson qui soit aussi fonction de l'état de contrainte. L'introduction d'un tel modèle dans CVCR pourrait peut être faire l'objet d'un stage.

$$E = A \cdot p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^B \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^C$$

Équation 1

On note finalement l'absence de modèles basés sur les constituants, et un besoin de réviser les catégories de GNT du guide de dimensionnement de 1994. On note aussi l'absence de modèles prenant en compte explicitement les conditions de compactage et d'humidité. Les relations de ce type qui existent dans la littérature sont habituellement empiriques et difficiles à mettre en pratique.

2.2.3 Rigidité des autres matériaux

Les bétons et matériaux stabilisés au ciment sont considérés linéaires élastiques et possèdent de très hauts modules. Le cas des matériaux stabilisés aux liants hydrocarbonés est plus complexe: l'expérience actuelle montre que leur rhéologie est à la fois viscoélastique et non linéaire et vieillissante (exemple: grave émulsion). On dispose de moins d'information pour les décrire, et on ne dispose pas de modèle rhéologique bien établi. Il s'agit d'un domaine de recherche actuel.

Les calculs de chaussée rigide sont effectués en tenant compte des charges de trafic, du poids propre des dalles de béton et des conditions de gradient thermique à l'intérieur de celles-ci. Le calcul des effets de joint de dalles requiert des méthodes de calculs permettant la prise en compte de discontinuités comme par exemple la méthode des éléments finis. Le calcul des chaussées rigides peut ainsi se faire avec les modules TACT et DECO du progiciel CESAR-LCPC (modules TACT et DECO). De tels outils permettent entre autres d'établir des facteurs de calage permettant des solutions analytico-empiriques approchées, ce qui se fait en pratique avec le logiciel ALIZÉ-LCPC. Le projet FISSUROUTE pourrait par ailleurs conduire vers des solutions analytiques.

2.2.4 Autres conditions affectant le comportement réversible

Les effets du vieillissement, de la fatigue, et des altérations par l'eau et par les cycles de gel et de dégel ne sont pas pris en compte dans les calculs de dimensionnement actuels. Beaucoup de travaux de recherche restent à faire pour atteindre ce stade. L'utilisation de modèles intégrant les conditions hydriques serait plus complexe et se heurterait à la difficulté de prédire les migrations d'eau dans les chaussées. Il existe des modèles de drainage et CESAR traite de certains problèmes de milieux non saturés (ex: module NSAT basé sur les équations de Richards) qui ont parfois été appliqués à la mécanique des chaussées. La plupart des applications actuelles se limitent plus simplement à l'usage de paramètres déterminés pour une ou quelques conditions représentatives du terrain.

2.3) Endommagements

Les deux mécanismes d'endommagement les plus communément rattachés aux calculs des structures de chaussées bitumineuses sont l'orniérage et la fissuration structurelle par fatigue et endommagement.

Le Guide technique *Conception et dimensionnement des structures de chaussées* propose une méthode et des critères basés sur des essais de fatigue pour les divers mélanges bitumineux, ainsi qu'une courbe d'orniérage établie pour les matériaux non liés. Cette dernière ne tient pas compte des caractéristiques des différents matériaux non liés. Ces modèles de fatigue et d'orniérage sont inclus dans le logiciel ALIZÉ-LCPC. Ils sont empiriques (courbes de Wohler) et appliqués uniquement au niveau des points conduisant aux déformations maximales dans les différentes couches composant la chaussée. Des travaux de recherche sont menés pour approfondir la compréhension des phénomènes réels. Des débouchés en ce sens seraient importants en mécanique des chaussées :

- La fatigue est liée à plusieurs phénomènes complexes tels que la viscoélasticité du bitume et les caractéristiques du mélange, incluant la qualité des liens entre le bitume et les granulats. Les enjeux liés à la fissuration des enrobés sont évidemment majeurs. Le phénomène de fatigue est présentement étudié dans la Division avec diverses configurations d'essais,

combinés avec des calculs suivant un modèle de dommage non local dans un continuum élastique. Ce dernier modèle a été implanté par Didier Bodin dans le système d'éléments finis CASTEM, du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). L'application est « open-source » et dédiée à la recherche.

- L'orniérage est un problème fondamentalement élastoplastique et dépend des matériaux. Il est présentement étudié dans la Division à l'aide d'essais de déformations permanentes et d'essais Manège combinés à des modèles élastoplastiques ou empiriques de seconde génération. Un modèle de ce dernier type, dédié à la recherche, a été implanté dans CESAR-LCPC-ORNI et ALIZÉ-LCPC-Aéronautique.
  La prévision rationnelle de l'orniérage, avec intégration des tassements sur toute l'épaisseur des couches, constitue un des défis majeurs de la géotechnique routière. Il faut continuer à consolider le passage labo-terrain que permet aujourd'hui la chaîne séquentielle suivante: essais triaxiaux, modèle rhéologique élastique non-linéaire (Boyce ou autre), modèle rhéologique en déformation permanente (Gidel, élastoplastique Chazallon ou autre), calculs des contraintes dans la chaussée avec ALIZE ou CESAR-CVCR, et finalement calcul d'orniérage avec ALIZE ou CESAR-ORNI.

Des travaux de recherches sont aussi requis concernant d'autres modes d'endommagement tels que par exemple la fissuration du haut vers le bas, les fissurations de retrait de thermique ou hydrique, la remontée des fissures, les effets de l'eau combinée aux charges et la détérioration des fissures existantes.

Il y a sans doute également un effort important à faire vis-à-vis de l'entretien, de la réparation, du renforcement des chaussées existantes. Ceci suppose de savoir reconnaître, mesurer et décrire l'état d'une chaussée dégradée et de savoir préconiser en conséquence les modes d'intervention possibles et prévoir leur nouvelle durée de vie. Ceci représente d'autres avenues de recherche pour les outils d'auscultation, de diagnostic et de modélisation.

3) Description des outils

Les logiciels sont décrits brièvement sous la forme de fiches descriptives classées par ordre alphabétique. Chaque fiche présente une description de l'outil, ainsi que des renseignements sur l'environnement informatique, les travaux de validation, l'emplacement ou disponibilité, de même que sur les perspectives et priorités d'avancement. Les perspectives et préconisations sont émises à titre indicatif, sans engager ou se substituer aux priorités projetés en définitive par les auteurs responsables de ces développements. Le Tableau 2 positionne ces outils selon leur ordre logique d'intervention dans un calcul de structure. En d'autres mots, il permet de suivre les maillons de la chaîne permettant de relier le laboratoire à la route.

Tableau 2 : Positionnement des divers outils dans le processus d'un calcul de structure (Recherche, analyse ou dimensionnement)

a) Matériaux : modèles de rigidité
Elastique (loi de Hooke) : ALIZÉ, Guides pour le dimensionnement Visco-thermo-élastique (Huet-Sayegh, …) : PREDICTA, VISCOANALYSE Elastique non-linéaire (Boyce, K-theta, …)

⇩

b) Structure : comportement réversible
Massif multicouches : ALIZÉ, VISCOROUTE Structure quelconque : CESAR-LCPC modules LINE, TACT, CVCR, DECO, DYNI (interface LICESAR), CASTEM

⇩

c) Endommagement	
i) Fatigue	**ii) Orniérage**
Courbes de Wolher : ALIZÉ Modèle avancé : recherche avec CASTEM	Courbes de Wolher : ALIZÉ Modèles avancés : recherche avec ALIZÉ et CESAR-LCPC-ORNI

3.1) ALIZÉ-LCPC-Routes

i) Description

Le logiciel ALIZE-LCPC est le programme de référence, depuis les années soixante-dix, pour les calculs de dimensionnement des chaussées en France. Il est fondé sur le calcul des sollicitations internes causées par le trafic dans les structures de chaussées en se basant sur la solution statique multicouche élastique linéaire isotrope de Burmister (1945). Ce logiciel offre de plus une aide complète au dimensionnement, conformément à la méthode rationnelle LCPC-SETRA. Sa mise au point a permis l'élaboration du guide de dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC 1994) et du catalogue de dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC), lesquels constituent les outils de dimensionnement les plus utilisés en France.
Ce logiciel inclut des menus d'aide, modules et sous programmes divers permettant de résoudre aisément et rapidement les expertises et calculs de dimensionnement normalement rencontrés en bureau d'étude. Il automatise la gestion de variantes ainsi que l'exploitation des résultats sous forme graphique. Il intègre aussi le module Gel1d-Routes pour la vérification au gel-dégel des chaussées selon la démarche complète LCPC-SETRA. Il s'applique également à des actions de recherche et d'enseignement.
Plusieurs ajouts et améliorations se font dans la version recherche (subdivision en couches pour approcher le comportement non-linéaire, module aéronautique, calculs avancés de l'orniérage, etc.), laquelle fait l'objet d'une évolution continuelle.

ii) Environnement informatique

Le noyau de calcul a été développé en langage FORTRAN par le LCPC. Il est en conséquence possible de le compiler sur divers systèmes d'exploitation (DOS, Windows, Unix, Linux…). L'enveloppe ergonomique comprenant l'interface utilisateur de même que tous les pré- et post- traitements a été développée sous Visual-Basic 6 pour Windows.

iii) Validation

Ce logiciel est depuis longtemps qualifié pour utilisation au LCPC et vente à l'extérieur. Il est validé au point d'être à la base de la méthode française de dimensionnement des chaussées.

iv) Emplacement

La distribution se fait par l'intermédiaire d'une entreprise privée, soit la société ITECH (www.itech-soft.com). La gestion du développement et des sources est faite en interne par Jean-Maurice Balay. Une version de l'exécutable se trouve sur R:\commun\Informatique\Logiciels\Alizé-installation.

v) Perspectives

ALIZÉ représente pour le LCPC un pilier important de transfert technologique et de valorisation en mécanique des chaussées. Ceci implique que ses besoins d'évolution sont intimement liés à l'état de l'art et aux retombées de la recherche.
Si le besoin s'en faisait sentir et moyennant une révision du noyau de calcul, il serait rigoureusement possible d'ajouter un paramétrage des conditions d'interface entre les couches, des composantes de chargement tangentiel, et éventuellement la prise en compte de coefficients d'anisotropie.

vi) Priorités à court terme

Voir l'outil ZEPHYR (section 3.11) pour la description d'une des priorités qui consisterait à introduire une approximation non-linéaire. Autrement, les priorités actuelles sont davantage tournées vers le module aéronautique. Il est aussi possible à moyen terme que son enveloppe ergonomique ait besoin d'une transcription conséquente puisque la plate forme de développement Visual-Basic est abandonnée par Microsoft.

3.2) ALIZÉ-LCPC-Aéronautique

i) Description

Le logiciel ALIZE-LCPC-Aéronautique est un module en cours de développement. Il se développe au sein du même code que la version Route mais sera vraisemblablement distribué séparément. Il utilise la même théorie des couches élastiques, sauf qu'une stratégie d'utilisation différente a été imaginée pour tenir compte des besoins particuliers à cette industrie, incluant par exemple les divers bogies d'aéroplane et leur distribution transversale et saisonnière de passage sur la piste. Ce module utilise une approche de dommages cumulés (loi de Miner) en fonction de la distribution des passages des roues d'aéroplanes et inclut notamment un prototype de calcul de l'orniérage par intégration des déformations sur toute l'épaisseur de la chaussée.

ii) Environnement informatique

Cet outil est greffé sur ALIZE-LCPC-Routes à l'intérieur de la version recherche. Il est donc développé dans le même environnement (Fortran et Visual-Basic).

iii) Validation

La version aéronautique est en cours de développement, et est destinée à être validée avec la collaboration du STAC et de la FAA.

iv) Emplacement

La gestion du développement et des sources est faite à l'interne par Jean-Maurice Balay. Une version de l'exécutable se trouve sur R:\commun\Informatique\Logiciels\Alizé-installation.

v) Perspectives

Le module aéronautique trace une voie qui pourrait influencer l'évolution de la méthode de calcul des chaussées routières (histogrammes de températures et cumul de dommages). Les applications routières et aéronautiques sont très similaires du point de vue de la mécanique fondamentale.

vi) priorités à court terme

La consolidation et validation de l'outil de calcul d'orniérage et du critère de calcul d'endommagement multipic figurent parmi les priorités les plus visibles pour atteindre une version finalisée.

3.3) CASTEM (implantation d’un modèle de fatigue dans)

i) Description

Un modèle d’endommagement non local isotrope a été implanté en 3D dans le code d’éléments finis CAST3M du Commissariat à l’énergie atomique (CEA). Il s’agit d’une loi originale à trois phases proposée en réponse aux lacunes de la méthode classique basée sur les courbes de Wohler. Le nouveau modèle évite les difficultés liées au calcul local plus compliqué grâce à l’introduction d’un paramètre de longueur interne supposé intrinsèque au mélange bitumineux et indépendant du volume de matériau sollicité. Ce modèle permet de reproduire l’évolution de rigidité d’une éprouvette soumise à un essai de fatigue à contrainte ou déformation contrôlée, jusqu’à l’initiation de la rupture macroscopique, incluant la phase de réchauffement initiale, et incluant diverses tailles d’échantillons et configurations d’essais de fatigue (traction compression, flexion 4 points, poutre trapézoïdale). Il fourni l’endommagement sur tous les éléments du maillage, ce qui donne une image de la répartition spatiale de l’endommagement. La capacité de bien gérer les effets d’échelle alimente la perspective d’applications intéressantes pour des chaussées en vrai grandeur.

ii) Environnement informatique

Le programme est écrit en FORTRAN et en GIBIANE, un langage spécifique à CAST3M. Des applications spécifiques sont faites à l’aide de SCILAB.

iii) Validation

Le modèle a été initialement développé et validé dans les travaux de thèse de Didier Bodin. Des développements additionnels suivent avec entre autres les travaux de Rami Chkir. Un autre stage supervisé par Didier Bodin est en cours pour effectuer des premiers tests de calculs à l’échelle d’une structure de chaussée.

iv) Emplacement

Le modèle de fatigue est développé par Didier Bodin. Le logiciel CASTEM est diffusé avec les sources sur internet (http://www-cast3m.cea.fr) par le CEA. Le modèle de fatigue (FatSin) devrait en faire partie à partir de la version 2008.

v) Perspectives

Il s’agit d’un outil pour le moment dédié à la recherche. Il sert à mieux comprendre les mécanismes de fissuration par fatigue. Cela ouvre des perspectives pour l’amélioration des essais de fatigue ainsi que leur interprétation. L’application à l’échelle d’une chaussée permettra d’aborder des problématiques suivant de nouveaux points de vue, comme par exemple la distribution spatiale des dommages dans les bandes de roulement et l’effet des multipics.
Il serait possible de reproduire les algorithmes de CESAR dans CASTEM et vice-versa. Par exemple, le modèle de rigidité non-linéaire de Boyce a été adapté à CASTEM par Allou (2003).

vi) Priorités à court terme

Vérifier la précision du modèle pour différentes tailles d’éprouvettes et différents mélanges bitumineux. . Vérifier notamment la pertinence du modèle appliqué à l’essai MEFISTO du Laboratoire Régional d’Autun. Réaliser des calculs à l’échelle d’une chaussée et comparer les résultats avec des essais manège.

3.4) CESAR - LCPC - modules standards LINE, TACT, DYNI …

i) Description

CESAR-LCPC est un progiciel général de calcul fondé sur la méthode des éléments finis et adapté à la résolution des problèmes du Génie civil et de l'Environnement : calcul de structures, mécanique des sols et des roches, thermique, hydrogéologie, béton au jeune âge, etc. Différents modules de calculs y sont greffés et peuvent s'utiliser en fonction des besoins. Les modules LINE, TACT, DECO et DYNI sont entre autres applicables aux structures de chaussées. Il y a aussi les modules CVCR et ORNI qui font l'objet d'une fiche séparée.

Le module LINE permet les calculs de milieux continus obéissant à la loi de Hooke et soumis à un chargement statique. Le module DYNI permet d'introduire une charge dynamique exprimée suivant différents pas de temps. Il est utilisé notamment pour l'interprétation d'essais au déflectomètre FWD (thèse en cours de Michael Broutin à l'aviation civile). Le module MCNL peut être utilisé pour des calculs élastoplastiques et le module MODE peut être utilisé pour chercher les fréquences propres d'un chemin de fer.

Le module TACT est l'un des principaux piliers du calcul des chaussées rigides, discontinues ou spéciales. Il permet en particulier de traiter les problèmes de contact unilatéral non linéaires entre couches de chaussées (thèse Sergio Pérez) et de reproduire les cambrures de dalles qui résultent des gradients verticaux de retrait thermique et hydrique dans les structures rigides. Il faut mentionner l'existence du module DECO (version recherche, thèse Salasca, 1998) qui vise aussi des analyses similaires.

Le module DECO vise, comme FISSUROUTE mais avec des éléments de plaque plus classiques, des modélisations RDM simplifiées des structures avec discontinuités, ce qui permet d'obtenir des exécutions relativement rapides. Ces éléments peuvent être superposés, liés entre eux par des relations linéaires et reposer globalement sur un massif de Pasternak. Ce module permet de la même façon que le module TACT de prendre simultanément en compte les charges de trafic, le poids propre des matériaux (notamment le poids des dalles de béton), les chargements d'origine thermique (gradients thermiques) et les conditions de contact unilatérales entre les dalles et leurs supports. La résolution est basée sur l'algorithme itératif d'Uzawa de recherche de point selle entre le champ de déplacement et le champ de forces internes associées aux conditions de contact unilatérales.

ii) Environnement informatique

Le solveur CESAR-LCPC est programmé en Fortran à l'intérieur de la plateforme de développement CESARDEV. Son utilisation requiert des interfaces telles que CLEO, MAX, PEG ou LICESAR.

iii) Validation

Le solveur CESAR est qualifié pour distribution et vente à l'extérieur. Des jeux de test préétablis, basés sur des solutions de références de diverses natures (analytiques, numériques ou expérimentales), sont exécutés avant la distribution de nouvelles versions.

iv) Emplacement

La gestion, incluant la maintenance et le développement, du solveur CESAR est assurée par la Section Modèles Numériques de la Direction des Programmes à Paris (DPR/MN). Les sources sont tenues à jour dans la plateforme CESARDEV, et sont disponibles sous réserve d'inscription au

répertoire des développeurs, auprès de Pierre Humbert. Le système combiné avec l'interface CLÉO est distribué par la société ITECH.

v) Perspectives

Le progiciel CESAR est sans doute l'outil de calcul le plus puissant produit par le LCPC. Il est utile en recherche, pour fournir des solutions de référence, même pour les situations où les temps de calculs le rendent moins opérationnel. Son potentiel d'utilisation s'accroît en fonction du gain de performance des ordinateurs, et son potentiel d'évolution est élevé de par sa nature générale.

vi) Priorités à court terme

Intégration du module CVCR dans la version Expert. Mise à disponibilité d'une interface adaptée aux calculs des structures de chaussées (voir LICESAR).

3.5) CESAR - LCPC – module CVCR

i) Description

Le module CVCR (**C**haussée **V**isco-élastique sous **C**harge **R**oulante) permet le calcul des déplacements, des déformations réversibles et des contraintes dans une chaussée multicouche soumise à une charge roulante. Cette chaussée peut être constituée de matériaux à lois de comportement élastique linéaire isotrope, élastique non linéaire éventuellement orthotrope pour les matériaux non traités ou les sols (modèles Boyce modifié, k-θ) et visco-élastique linéaire isotrope pour les enrobés bitumineux (modèle Huet & Sayegh).

En la seule présence de matériaux élastiques linéaires ou non linéaires, l'utilisation du module CVCR permet de modéliser des structures dont la géométrie et la nature du chargement peuvent être quelconques. La présence d'un matériau viscoélastique (loi de comportement fonction du temps) entraîne la réalisation du calcul dans le repère de la charge roulante (détermination du régime pseudo-permanent) et oblige à respecter un certain nombre de règles telles que par exemple une modélisation tridimensionnelle et l'uniformité de la structure dans le sens de passage de la charge.

Le module standard LINE peut faire les mêmes calculs que CVCR s'il n'y a aucun élément viscoélastique et aucun élément non-linéaire.

ii) Environnement informatique

Le module CVCR est programmé en Fortran à l'intérieur de la plateforme de développement de CESAR-LCPC. Son utilisation requiert une interface telle que CLEO, MAX, PEG ou LICESAR. Il n'est pas encore parfaitement intégré à ces interfaces puisque sont intégration dans la version Expert n'est pas complété. L'exploitation est pour le moment compliquée du fait que le pré et post traitement impliquent l'alternance entre des outils Windows (CLEO, LICESAR) et Unix 32 bits (LICESAR) pendant que l'exécutable ne se compile que sous Linux 64 bits (CESARDEV).

iii) Validation

Le module CVCR a été validé sur le plan numérique et dans le domaine d'emploi viscoélastique par comparaison avec diverses solutions analytiques et semi-analytiques, notamment avec le logiciel VISCOROUTE. Le comportement en élasticité linéaire et non linéaire a été validé à partir de la simulation d'essais triaxiaux homogènes. Le module CVCR a par ailleurs été appliqué à divers cas opérationnels dans le cadre de travaux de recherche et d'expertise permettant d'illustrer ses principaux apports. Des exemples détaillés avec jeux de données et solutions de référence sont décrits dans le Cahier de développement (Nguyen et al., 2008). Le module CVCR est en voie de passer dans la version Expert.

iv) Emplacement

Les sources sont tenues à jour dans la plateforme CESARDEV gérée par la Section Modèles Numériques de la Direction des Programmes à Paris (DPR/MN). Elles sont disponibles sous réserve d'inscription au répertoire des développeurs, auprès de Pierre Humbert. Le module CVCR est en voie de passer dans la version Expert de CESAR-LCPC, ce qui permettra de rendre son exécutable accessible à une plus large clientèle. Il sera éventuellement distribué par la société ITECH.

v) Perspectives

Le module CVCR constitue le troisième programme de calcul mécanique de chaussée non linéaire, après les précédentes tentatives appelées NOEL et MCHS. Ceux-ci n'incluaient cependant pas de

comportement viscoélastique. Son utilisation dans le cadre de projets de recherche a permis de reproduire plus fidèlement à la réalité certains résultats d'essais, par rapport à ALIZE, avec une meilleure restitution des ordres de grandeur des déformations mesurées en bas de couche bitumineuse et un meilleur classement en amplitude des déformations longitudinales et transversales. Il permet aussi de mettre en évidence les contraintes de traction qui se créent en surface de chaussée derrière le passage d'une charge roulante.

Les perspectives sont donc prometteuses, et les avantages se font particulièrement sentir dans les applications suivantes :

- la modélisation des chaussées routières à assises non traitées et bitumineuses, et notamment le traitement de conditions particulières de chargement (vitesse lentes, températures élevées..).
- la modélisation de chaussées aéronautiques ou spéciales telles que les plates-formes industrielles, où CVCR permet notamment une meilleure prise en compte des charges lourdes et vitesses de chargement lentes.
- Le calcul des champs de contrainte et de déformation réversible pour une exploitation en vue de prédire l'orniérage : il sert de point de départ pour le module ORNI de CESAR-LCPC.

Le module CVCR permet des calculs de référence pouvant appuyer l'élaboration d'un éventuel outil non linéaire simplifié destiné aux bureaux d'études (voir ZEPHYR). Les enjeux de la viscoélasticité et de la non linéarité sont discutés plus en détails dans la section 2.

Un calcul tridimensionnel demande au moins deux heures sur le serveur lncalsun de Nantes. Selon Pierre Humbert, la vitesse peut être décuplée en utilisant un solveur « multifrontal » à la place du solveur sky line actuel. Il serait aussi possible de réduire significativement les temps de calcul en introduisant des éléments semi-infinis : Guezouli (1994) indique que cela permet de diviser le temps de calcul de 80% en 2D (logiciel NOEL) et davantage en 3D.

vi) Priorités à court terme

Confirmer la validité des extrapolations de modules avec le modèle de Boyce en présence d'états de contraintes inaccessibles par les essais triaxiaux, ou sinon offrir des solutions alternatives. Je participe actuellement sur certains travaux à ce sujet.
Compléter le passage à la version Expert, compléter l'harmonisation des interfaces CLÉO et LICESAR et rendre l'outil disponible.

3.6) CESAR - LCPC – module ORNI

i) Description

Le module ORNI est destiné à la prévision de l'orniérage structurel ainsi que des couches bitumineuses des chaussées. Il s'agit d'un outil de recherche en cours de développement dans le système CESAR-LCPC. Il permet actuellement de faire des calculs de déformations permanentes dans les matériaux granulaires non traités. L'approche est basée sur la notion de chemin de contrainte, dans le plan des invariants de contraintes p et q, préalablement calculés avec le module CVCR. Le calcul des dommages élémentaires, liés au passage d'une charge roulante, se fait à l'aide du modèle empirique proposé par Gidel et al. (2001). L'outil permet de cumuler les déformations permanentes résultant de plusieurs types de véhicules circulant à différentes vitesses et températures. La version actuelle permet de calculer l'orniérage dans une couche à la fois.

ii) Environnement informatique

Le module ORNI est programmé en Fortran à l'aide de la plateforme de développement de CESAR-LCPC.

iii) Validation

Il s'agit d'un prototype ayant fait l'objet de peu de validation à ce jour. Des études sont en cours afin de vérifier ses aptitudes à prédire l'orniérage sur les chaussées à partir d'essais de déformations permanentes en laboratoire, et le cas échéant pour déterminer les possibles améliorations à apporter.

iv) Emplacement

Le projet est en cours de développement sous la supervision de Pierre Hornych. Les sources seront introduites dans la plateforme CESARDEV dès que les travaux seront suffisamment avancés.

v) Perspectives

Le module ORNI est lourd d'utilisation mais il y a lieu de croire qu'une solution approchée unidimensionnelle soit possible avec un écart de moins de 10%, ce qui permettrait une implantation dans un outil de calcul rapide comme ALIZÉ. Voir la section 2.3 pour d'autres commentaires sur les enjeux de l'orniérage.

Les recherches sont à poursuivre aussi bien pour les matériaux non liés que pour les matériaux bitumineux. La division s'est investie à cette fin dans l'acquisition d'un matériel d'essai triaxial pour enrobés bitumineux et dans le démarrage de projets de recherche orientés sur le sujet (ex : thèse Juliette Sohm, arrivée de Thomas Gabet…).

vi) Priorités à court terme

Il s'agit en prochaine étape de tenter de reproduire par calcul un plus grand nombre de cas tels que les essais Manège considérés dans le projet européen SAMARIS, et des données de chaussées réelles issues de la coopération avec les LRPC.

> Note : Il y a une difficulté potentielle du fait que les premiers calculs tendent à indiquer l'existence d'une différence importante de cinétique entre les courbes de déformation permanente mesurées en laboratoire et celles mesurées sur le terrain. On soupçonne que cela puisse provenir de la rotation des contraintes sous le passage d'une charge roulante. Les calculs additionnels permettront de confirmer la présence ou non de ce problème et de chercher à mieux le comprendre.
>
> En complément, la modélisation des essais à l'ornièreur devra être entreprise avec un double objectif : i) celui à relativement court terme d'utiliser ces résultats d'essai pour aider à la mise au point des modèles d'orniérage des enrobés bitumineux, ii) celui attendu à plus long terme de pouvoir utiliser ces essais pour le calage inverse des lois de fluage de ces matériaux.

3.7) FISSUROUTE

i) Description

La prédiction de l'évolution de la fissuration dans les structures de chaussées est un enjeu essentiel de la démarche de conservation du patrimoine routier. Les modèles simplifiés usuels de dimensionnement des chaussées sont à cet égard très mal adaptés. Une des orientations possibles implique des modélisations numériques 3D par éléments finis, nécessitant des maillages très fins, coûteux en temps de programmation et de calcul.

Le LAMI et la division MSC ont proposé, dans le cadre de la thèse ENPC de Tran (septembre 2004) une approche alternative s'appuyant sur des modèles enrichis, de type RDM (résistance des matériaux), les modèles multiparticulaires des matériaux multicouches (M4) pour la modélisation du corps de chaussée (Tran, 2004 ; Chabot et al., 2005). Cette approche repose sur le couplage entre un modèle multicouche élastique simplifié adapté aux problèmes de flexion, le M4-5n (5 équations d'équilibre par couche) développé à l'ENPC (Chabot, 1997) et le modèle élastique de Boussinesq pour le sol support. Ce modèle a pour avantage de régulariser les contraintes aux droits des fissures et des interfaces et de réduire le problème d'une dimension.

ii) Environnement informatique

Les algorithmes existent présentement sous forme de prototype bicouche sur massif de sol dans l'environnement MATLAB avec fissures transversales verticales.

iii) Validation

Les cas de chargement de pression uniforme verticale sur une surface rectangulaire ainsi que de gradient et de retrait thermiques ont été validés par comparaison avec des calculs ALIZÉ et avec le module LINE de CESAR-LCPC. Des résultats d'essais accélérés en vraie grandeur –FABAC– de collage béton de ciment sur grave bitume (thèse Pouteau 2004 ; Chabot et al., 2008) et de remontée de fissure dans les couches de béton bitumineux sont actuellement interprétés. Le modèle est également exploité en recherche pour la compréhension de mécanismes de fissuration dans les coins de dalle en béton de ciment mince collé (BCMC). La numérisation du modèle M4-5nB sous la forme d'un outil tournant sur PC n'est pas encore faite.

iv) Emplacement

Le projet est en cours de développement sous la supervision d'Armelle Chabot dans le cadre de l'opération Fondephy (11P065). Il y a eu des publications mais il s'agit encore en ce moment d'un projet qui est au stade de concept théorique et analytique. Il n'a pas été possible d'en obtenir un exemplaire, l'outil numérique n'étant pas jugé assez avancé pour le moment.

v) Perspectives

Ce modèle permet d'évaluer les contraintes de cisaillement et d'arrachement à l'interface entre deux couches de matériaux au voisinage d'une fissure verticale et d'une interface de décollement. Pour envisager des calculs de propagation de fissure sous chargement cyclique, les temps de calcul doivent être encore optimisés. Pour mettre au point un premier outil de calcul rapide, il est actuellement envisagé de remplacer le massif de Boussinesq par un système de ressorts comme dans le modèle de Westergaard et de ne traiter que le cas de 2 à 3 couches de chaussée. La perspective d'arriver à calculer des champs de contraintes au voisinage de fissures est particulièrement intéressante pour les études concernant l'entretien de chaussées existantes. Il est à noter que le module DECO implanté dans CESAR-LCPC repose sur le même type d'approche, en étant basé toutefois sur les éléments de plaque plus classiques déjà introduits dans CESAR.

vi) Priorités à court terme

Le développement de ce modèle doit être plutôt vu sur le moyen et long terme en vue de cheminer vers un outil applicable. Il peut entretemps servir à des fins de recherche à l'intérieur de la division.

3.8) LICESAR

i) Description

LICESAR est un utilitaire de pré et post traitement spécialement adapté pour faciliter les calculs de mécanique des chaussées avec le système CESAR-LCPC. De nombreuses structures de chaussée continues, discontinues ou spéciales présentent une géométrie « simple », que l'on décrit avantageusement dans un premier temps dans LICESAR sous forme « topologique » (sans faire appel aux véritables coordonnées) à partir d'un assemblage de couches délimitées par des rectangles (en 2D) ou par des parallélépipèdes rectangles (en 3D). Ceci permet de s'assurer par exemple de la présence dans le maillage de joints ou fissures de faibles épaisseurs comparativement aux éléments adjacents ou d'introduire aisément des relations linéaires entre des nœuds géométriquement très voisins, mais non confondus.
A partir de là il n'est pas toujours nécessaire de disposer de toutes les fonctionnalités d'un outil général comme MAX ou CLEO. L'utilitaire LICESAR constitue donc une alternative pour accroître la productivité d'utilisation des modules de calculs tels que LINE, CVCR, ORNI, TACT, DYNI ou autres. Il reste très général au point de vue de la mécanique des chaussées, puisqu'il permet de créer des zones non-maillées et d'insérer des éléments de contacts. Il permet aussi d'introduire des rails de chemin de fer. Il est aussi possible d'automatiser son utilisation à l'aide de fichiers de dialogue similaires à ceux des utilitaires MAX et PEGGY, ce qui représente un avantage important.

ii) Environnement informatique

LICESAR est programmé en Fortran et existe en versions compilées sous DOS et Unix.

iii) Validation

L'utilitaire ne réalise pas les calculs à proprement parler. Il sert essentiellement à créer les fichiers de maillage et interroger les bases de résultats produites par CESAR. Il utilise des routines de MAX ou CESAR pour plusieurs opérations (lecture, écriture, renumérotation des éléments, etc.) et se valide à l'usage, à mesure que des ajouts ou modifications sont effectués.

iv) Emplacement

Il s'agit d'un utilitaire principalement dédié à l'usage de la Division. Les sources sont maintenues et gérées par Jean-Maurice Balay. Les exécutables sont disponibles sur demande auprès de lui.

v) Perspectives

Il s'agit d'une application clavier de style DOS. L'exploitation des résultats sous forme graphique requiert encore l'usage d'outils d'appoints tels que PEG, CLEO, SCILAB, EXCEL ou autre, ce qui représente le principal handicap. Ce handicap est compensé par la possibilité d'appeler le logiciel avec des fichiers de dialogue (fichiers donli). Un utilisateur averti peut utiliser cette particularité pour fabriquer ses propres routines d'exécution.

L'avenir de LICESAR n'est pas clairement défini, autrement que dans son contexte d'utilisation actuel. Une réflexion s'impose pour déterminer le sort qu'il mérite : Il reste difficilement contournable lorsqu'on le connaît bien, considérant les gains de temps appréciables pour produire le maillage d'une chaussée. Il répond à un besoin réel qui n'est pas autrement comblé pour les applications chaussées avec CESAR. Son abandon serait dommage sans la mise au point d'une autre interface dédiée aux chaussées.

vi) Priorités à court terme

Écrire un manuel d'utilisation, avec exemples d'utilisation, pour le rendre davantage communicable. Finaliser certains petits détails, comme par exemple l'intégration des particularités du module CVCR. Ajouter le support des formats de fichiers RSV4 (version 4) pour compatibilité avec CLÉO.
La division SMIT devrait s'interroger sur l'intégration de cet outil au sein d'une plate forme de calcul et de mise en données des problèmes de chaussées.

3.9) PREDICTA

i) Description

Cet outil vise à prédire le module complexe d'un enrobé bitumineux, soit les paramètres du modèle de Huet-Sayegh, à partir de ses constituants granulats et bitume. Cette donnée constitue un intrant au calcul des structures de chaussées viscoélastiques. L'outil se base sur un modèle auto cohérent avec une morphologie de type inclusion-couronne a priori bien adaptée à la description des enrobés bitumineux. Cette méthode permet de calculer le module et l'angle de phase de l'enrobé à partir du module complexe et du coefficient de Poisson du bitume, des caractéristiques élastiques des granulats et de la proportion de divers constituants du mélange.

Cet outil peut servir en amont des calculs de structure, en jouant le même rôle que VISCOANALYSE, mais sans avoir à faire les essais sur enrobé.

ii) Environnement informatique

PREDICTA est développé dans SCILAB (un concurrent gratuit de MATLAB).

iii) Validation

Une étude paramétrique a été réalisée pour comparer les valeurs calculées avec des valeurs expérimentales en fonction des teneurs en liant et en vide. Les résultats sont satisfaisants pour des températures inférieures à 30-40°C, ou en d'autres termes lorsque le module de rigidité est supérieur à environs 1500 MPa.

iv) Emplacement

Le logiciel a été programmé au cours d'un stage (Alam Yasir) supervisé par Ferhat Hammoum. Il est disponible sur le répertoire R:\commun\Informatique\Logiciels\Predicta.

v) Perspectives

Cet outil ouvre un passage entre la formulation du mélange et la performance structurelle sur chaussée. Il est intéressant pour la prédiction de performance des enrobés dans un calcul de structure de chaussée, même si les intrants requis ne sont pas toujours disponibles en pratique. Il cadre bien avec les orientations de recherche de la division dans le domaine de la viscoélasticité. Voir la section 2.2.1 pour d'autres commentaires sur les enjeux de la viscoélasticité. La validation pourra se poursuivre à l'usage. Il serait intéressant de le vérifier avec des enrobés du Québec où les bitumes sont sensiblement plus mous.

vi) Priorités à court terme

Peaufiner l'interface utilisateur pour le rendre un peu plus ergonomique, ce qui pourrait vraisemblablement se faire en quelques jours. Écrire un manuel d'utilisation et qualifier l'outil pour le rendre disponible.

3.10) VISCOANALYSE

i) Description

VISCOANALYSE est un outil qui permet de visualiser des mesures de module complexe, d'interpréter les données en terme de température d'isomodule et d'isoangle, de construire des courbes maîtresses et finalement de calibrer des modèles analogiques (Huet, Huet-Sayegh, 2S2P1D). Il s'applique aussi bien aux liants bitumineux qu'aux enrobés.

Il ne s'agit pas d'un logiciel de calcul de structures puisqu'il s'utilise au niveau de l'interprétation d'essais de laboratoire et d'identification de paramètres de lois de comportement prédéterminées. Il a été jugé pertinent de le mentionner puisqu'il permet, en amont, de déterminer les paramètres de la loi viscoélastique de Huet-Sayegh pour les enrobés. Rappelons que cette loi est utilisée dans VISCOROUTE et CVCR.

ii) Environnement informatique

VISCOANALYSE est développé sous Windows dans le système MATLAB.

iii) Validation

Il n'y a pas de publication à ce sujet, mais le logiciel a été qualifié pour distribution sur le site Internet du LCPC.

iv) Emplacement

Le logiciel est développé et géré par Emmanuel Chailleux. L'exécutable est distribué à ceux qui remplissent un formulaire de demande sur le site Internet du LCPC (http://www.lcpc.fr/fr/produits/viscoanalyse/index.dml). Une version de l'exécutable se trouve sur le R:\commun\Informatique\Logiciels\Viscoanalyse.

v) Perspectives

Il s'agit d'un utilitaire intéressant pour la caractérisation des enrobés, préalable aux calculs de dimensionnement. Il cadre bien avec les orientations de recherche actuelles dans le domaine de la viscoélasticité. Voir la section 2.2.1 pour d'autres commentaires sur les enjeux de la viscoélasticité.

vi) Priorités à court terme

Publier un article de référence et faire connaître l'outil.

3.11) VISCOROUTE

i) Description

Le logiciel VISCOROUTE permet de calculer de manière semi-analytique les champs de sollicitation dans une chaussée composée de matériaux viscoélastiques (modèle de Huet-Sayegh, 1963) et soumise au passage d'une charge roulante. On assume l'hypothèse d'un régime permanent, ce qui permet d'éviter l'introduction d'un pas de temps en transposant le problème dans le repère de la charge roulante ($x = X - V \cdot t$). L'algorithme de calcul s'appuie sur une formulation résolue dans l'espace fréquentiel de Fourier à partir des résultats de la thèse de Nguyen (2002) et du développement mathématique de Chabot (2000). Les capacités de modélisation sont résumées dans le Tableau 1.

ii) Environnement informatique

Le noyau de calcul a été développé en langage C++ à l'ENPC (Duhamel et al., 2003). Son utilisation peut impliquer une étape d'interpolation en post traitement (Senti, 2007) puisque les résultats sont calculés le long d'un maillage bidimensionnel généré à la profondeur voulue. Il est possible de compiler le moteur de calcul sur divers systèmes d'exploitation (DOS, Windows, Unix, Linux…).
L'interface utilisateur de la première version a été développée sous Visual-Basic 6 pour Windows (Duhamel et al., 2005 ; Chabot et al. 2006). Une seconde interface a été entamée sous Python en 2006 dans le cadre du Post-Doc de Nguyen Tung. Cette version non finalisée ajoute la possibilité de traiter directement les cas multicharge à pression uniforme sur des surfaces ponctuelles ou à contour rectangulaire ou elliptique.

iii) Validation

La validation des calculs viscoélastiques a été obtenue par comparaison avec une solution semi-analytique dans le cas d'un massif semi-infini (Chabot et Piau, 2001), et par comparaison avec des calculs par éléments finis issus du module CVCR de CÉSAR-LCPC. Des comparatifs ont aussi été faits avec des résultats issus d'un logiciel similaire à l'étranger (VEROAD : Senti, 2007), avec des résultats d'ALIZÉ pour des cas élastiques, ainsi qu'avec des mesures de jauges de déformations (Lohf 2005; Poché 2005). L'outil actuel ne parvient pas toujours à résoudre la double transformée inverse de Fourier requise pour transposer la solution dans le domaine réel. Certains calculs peuvent donc s'avérer plus longs et se terminer par un message d'avertissement indiquant que le calcul n'a pas pu se compléter adéquatement.

iv) Emplacement

La gestion du développement et des sources est faite par Armelle Chabot, dans le cadre de l'opération de recherche 11P065 (Fondephy). L'exécutable de la version 1 (charge rectangulaire unique et interfaces collées) se trouve sur le R:\commun\Informatique\Logiciels\Alizé-installation.

v) Perspectives

La version 1 est disponible à l'interne et prête à être diffusée. Les ajouts projetés pour de futures versions sont indiqués dans le Tableau 1 (décollement d'interface entre couches, chargement multiple, pressions de contact non uniforme à partir de mesures réelles). Ces ajouts sont en voie d'être faits par Olivier Chupin présentement au SMIT. Voir la section 2.2.1 pour d'autres commentaires sur les enjeux de la viscoélasticité.
La vitesse d'exécution de cet outil, lorsque la transformée inverse de Fourrier ne pose pas de problème, le rend potentiellement intéressant pour des applications de type bureau d'étude. Il pourrait à terme cohabiter avec la solution élastique de Burmister, ou même la remplacer, à l'intérieur d'un outil complet comme ALIZÉ. Ceci impliquerait probablement un nouvel étalonnage de la méthode de dimensionnement.

vi) Priorités à court terme

Vérifier la validité numérique des résultats obtenus en bord de charge près de la surface. Améliorer l'algorithme d'intégration numérique pour assurer la convergence en tout temps. Qualifier l'outil pour mettre une version à disposition de tous. S'exercer à son usage. Chercher et proposer des critères pour le dimensionnement.

3.12) ZÉPHYR (ALIZÉ)

i) Description

ZÉPHYR est le résultat d'un projet d'adaptation de la théorie des couches élastiques pour introduire la prise en compte de l'élasticité non-linéaire lors du calcul rapide des structures de chaussées. L'idée consiste à subdiviser les couches non-linéaires en sous-couches élastiques, et à déterminer le module d'élasticité en accord avec le modèle rhéologique choisi (Boyce, K-theta,…) à l'aide d'un algorithme itératif. L'approche ne peut être qu'approximative, puisqu'elle ne tient compte que des variations de modules se produisant le long de l'axe vertical (voir la Figure 3 pour un exemple de calcul plus complet incluant les variations verticales et horizontales). Elle pourrait par contre constituer une amélioration par rapport à la règle de subdivision des couches actuellement retenue dans le Guide technique *Conception et dimensionnement des structures de chaussées* (SETRA-LCPC, 1994).

ii) Environnement informatique

Il s'agit d'un prototype développé en Fortran, autour d'un ancien exécutable d'ALIZÉ en version DOS. Il existe aussi un algorithme similaire intégré dans la version recherche d'ALIZÉ-LCPC.

iii) Validation

Le premier prototype utilise le modèle de Boyce et ne converge pas de façon stable ou satisfaisante. Il n'a jamais été complété sous une forme finalisée. Un algorithme similaire a aussi été implanté dans la version recherche d'ALIZÉ pour Windows : Il utilise le modèle K-theta et semble converger plus rapidement, mais il aurait aussi besoin d'un travail de consolidation et de validation. Le projet a été suspendu pendant un certain temps, en partie à cause de l'absence de valeurs de référence. Le module CVCR de CESAR donnera accès à de nouveaux avancements en permettant l'établissement de valeurs de références.

J'ai fait des tentatives avec ma propre version expérimentale écrite sous Excel autour du noyau de calcul « open source » LEAF de la FAA. J'ai éprouvé des problèmes de stabilité des itérations et il semble à priori qu'une asymptote dans le modèle de Boyce y soit pour quelque chose. Cet aspect fait l'objet de questionnements en ce moment.

iv) Emplacement

Un version des sources du premier prototype, développées au cours d'un stage (Abdelah Kazai) supervisé par Jean-Michel Piau, se trouve sur la plate forme Unix dans :
/msc/jmpiau/cesar/develop/Kazai/Zephe/tempo/brieuc.

Le développement dans ALIZÉ-LCPC-Routes (version Windows) est géré par Jean-Maurice Balay.

v) Perspectives

L'approche est potentiellement intéressante quoiqu'approximative. Son intérêt se situe principalement pour des applications en bureau d'étude, nécessitant des outils simples et rapides d'utilisation. La vitesse de calcul des éléments finis (CESAR-CVCR) est suffisante pour éviter l'approximation ZEPHYR lors d'un calcul 2D axisymétrique (essai de plaque ou FWD). On ressent toutefois le besoin d'une solution accélérée pour les calculs de dimensionnement impliquant des pneus jumelés ou essieux multiples, même si c'est en sacrifiant une partie de l'exactitude du calcul 3D. L'approche ZEPHYR pourrait éventuellement répondre à ce besoin, moyennant des efforts additionnels. Voir la section 2.2.2 pour d'autres commentaires sur les enjeux de la non-linéarité.

vi) Priorités à court terme

La validation de la méthode est conditionnelle à l'existence d'un outil plus exact tel que CESAR-CVCR. Il faut donc s'en servir pour confirmer sa faisabilité, après avoir réglé la problématique de l'asymptote des modules issus du modèle de Boyce. Il sera ensuite possible de déterminer si un tel outil peut être mené à terme. Certains exemples américains[1,2] tendent à indiquer qu'une approximation soit possible.

---

[1] Huang, T.H. (1993) *Pavement analysis and Design (Logiciel KENLAYER)*. Prentice Hall, pages 132 à 136.

[2] *Everseries user's guide*, Washington State DOT, http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/Apps/EPG.htm

4) Perspectives générales

Les logiciels précédemment décrits sont loin de couvrir l'ensemble des résultats de recherche de la division mais constituent déjà une somme de connaissances non négligeable.

Le logiciel ALIZÉ est l'outil appliqué actuel, s'appuyant sur des connaissances fondamentales et sur une vaste expertise. L'orientation du module aéronautique préfigure possiblement la prochaine évolution qu'on peut imaginer pour le dimensionnement des chaussées routières.

Le noyau de calcul du logiciel VISCOROUTE pourrait éventuellement, à terme, prendre la succession du noyau de calcul élastique d'ALIZÉ, ou du moins servir à ajuster et appuyer certaines hypothèses de calcul. L'applicabilité est soumise entre autres à l'élaboration d'une base de données sur la viscoélasticité des enrobés : le développement parallèle des logiciels VISCOANALYSE et PREDICTA, de même que le projet de base de donnée Internet VISCOMATDATA actuellement en incubation. Le développement de l'essai de rupture locale répétée avec protubérances convexes, démontre que l'enjeu de la viscoélasticité et de la compréhension à un stade relativement amont de ses effets sur le comportement des enrobés est hautement considéré par la division SMIT

Un autre apport important est à faire du côté des déformations réversibles avec la modélisation non linéaire. Le module CESAR-CVCR représente un grand pas en réponse à ce besoin. Outre certaines questions à éclaircir concernant le comportement rhéologique des GNT, il reste du travail à faire pour rendre l'outil opérationnel en bureau d'étude. Certains efforts ont été faits pour mettre au point un outil simplifié (projet ZÉPHYR), mais il n'y a pas encore eu d'aboutissement probant à cet effet.

Un effort important reste à faire pour élaborer des outils opérationnels tenant compte des discontinuités (joints, fissures) dans les revêtements souples et rigides. Les modules TACT et DECO ont été conçus dans CESAR à cet effet, et le projet FISSUROUTE constitue une des autres pistes à creuser, en particulier pour traiter les questions de décollement et de propagation de macro fissures.

Les dommages irréversibles sont encore plus difficiles à maîtriser, et c'est l'objectif à atteindre au bout du compte. Ils dépendent en premier lieu de la réponse réversible, d'où l'intérêt d'un assemblage entre les calculs élastiques, viscoélastiques et non linéaires dans un outil tel que CVCR. D'autres travaux sont en cours dans la Division pour améliorer les connaissances scientifiques ayant trait à la fatigue (CASTEM) des enrobés et à l'orniérage (ORNI). Ces deux sujets pourront demander beaucoup d'efforts de recherche et développement dans les années à venir. Ces recherches déboucheront sans nul doute sur de nouvelles connaissances utiles pour les applications futures.

5) Bibliographie

ALIZÉ

- « Alizé-LCPC : Présentation générale du logiciel » www.lcpc.fr/fr/produits/alize/index.dml
- Autret, P., A.B. DeBoissoudy et J.P Marchand (1982) « ALIZE III Practice » Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Delft University of Technology, Netherlands.
- Balay, J.-M. « Alizé-Lcpc routes - Logiciel pour le calcul des sollicitations internes dans les structures de chaussées et aide au dimensionnement selon la méthode rationnelle française Lcpc-Sétra – Notice d'utilisation simplifiée »

CASTEM

- Site Internet: http://www-cast3m.cea.fr/cast3m/index.jsp
- Allou, F. (2003) « Etude du comportement réversible à long terme des graves non traitées et du sol support de chaussée » mémoire de DEA, Université de Limoges.
- Voir bibliographie de MODÉLISATION NON LINEAIRE et MODÉLISATION DE LA FATIGUE

CESAR-LCPC, références générales

- Site Internet : http://www.lcpc.fr/fr/produits/cesar/presentation/index1.dml
- Humbert, P., Fezans G., Remaud D. (2005) « CESAR-LCPC, un progiciel de calcul dédié au génie civil », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n° 256-57.
- Pérez, S. (2008) « Approche Expérimentale et Numérique de la Fissuration Réflective des Chaussées » thèse de doctorat, Université de Limoges.
- Salasca, S. (1998) « Calcul par éléments finis des états de contraintes dans les chaussées rigides : évaluation des phénomènes de contact associés aux effets de retrait et de température, application à l'interprétation d'expérimentations sur site », thèse de doctorat, Université de Nantes.

CESAR-LCPC, module CVCR

- Boyce H.R. (1980) *« A non linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading »*
  International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea (UK), 7-11 january 1980.
- Corté J.F., Di Benedetto H. (2005) *« Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants »* Traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux, Hermès – Lavoisier, 2005.
- Heck J.V. (2001) *« Modélisation des déformations réversibles et étude des déformations permanentes des enrobés bitumineux - Application à l'orniérage des chaussées »* Thèse de doctorat de l'ECN, soutenue le 30/10/01
- Heck J.V., Piau J.M., Gramsammer J.C., Kerzreho J.P., Odéon H. (1998) *« Thermo-visco-elastic modelling of pavements behaviour and comparison with experimental data from the LCPC test track »* Proc. 5th Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway, July 1998
- Hicks R.G., Monismith C.L. (1972) « Prediction of the resilient response of pavements containing granular layers using non-linear elastic theory » Proceedings of 3rd Int. Conference on Asphalt Pavements, vol1., pp 410-429.

- Hornych P., Kazai A., Piau J.M. (1998) *« Study of the resilient behaviour of unbound granular materials »* proceedings 5th Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norvège, Juillet 1998
- Nguyen, V.T, P. Hornych, D. Bodin, J.-M. Piau et D. St-Laurent (2008) « CESAR-LCPC version Recherche. Cahier de développement » Le module de calcul CVCR. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Voir bibliographie de MODÉLISATION NON LINEAIRE et MODÉLISATION VISCOÉLASTIQUE

CESAR-LCPC, module ORNI

- Chazallon, C. (2000) « An élastoplastic model with kinematic hardening for unbound aggregates in roads », UNBAR 5 Conference, Nottingham, 21-23 June, pp 265-270.
- Chazallon, C., T. Habiballah, P. Hornych (2002) « Elastoplasticity framework for incremental or simplified methods for unbound granular materials for roads, BCRA workshop on modelling of flexible pavements, Lisbon, June 2002.
- El Abd, Absamad (2006) « Développement d'une méthode de prédiction des déformations de surface des chaussées à assises non traitées » thèse de doctorat de mécanique, Université de Bordeau.
- Gidel G. (2001) « Comportement et valorisation des graves non traités calcaires utilisés pour les assises de chaussées souples » Thèse de doctorat. Université Bordeaux I.
- Gidel, G., P. Hornych, J.J. Chauvin, D. Breysse, A. Denis (2001) « Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés » Bulletin des LPC n°233, pp 5-21.
- Hornych, P. et A. El Abd (2006) « Development and validation of a method of prediction of structural rutting of unbound pavement layers » Work package 5 Performance-based specifications, SAMARIS: Sustainable and Advances Materials for Road Infrastructure, Competitive and Sustainable Growth Programme. Document number SAM-05-DE27, 94 pages, 5 janvier 2006.
- Hornych, P. J.F. Corté, J.L. Paute (1993) « Étude des déformations permanentes sous chargement répétés de trois graves non traitées, Bulletin LPC n°184, pp. 45-55.
- Hornych, P., A. Karzai, A. Quibel (2000) « Modelling a full scale experiment on two flexible pavements with unbound granular bases » UNBAR 5, Intl. Symposium on unbound aggregates in roads, Nottingham, pp 359-367.
- Hornych, P., A. Karzai, J.M. Piau (1998) « Study of the resilient behaviour of unbound granular materials » 5th Conference on bearing capacity of roads and airfiels, Trondheim, Norway, July 1998, vol 3, pp 1277-1287.
- Hornych, P., J.P. Kerzrého, S. Salasca (2002) « Prediction of the behaviour of a flexible pavement using finite element analysis with non-linear elastic and visco-elastic models » 9th Intl. Conference on asphalt pavements, Copenhagen, Août 2002.

GUIDES POUR LE DIMENSIONNEMENT

- SETRA-LCPC (1994) Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide technique, Ministère de l'Équipement des Transports et du Tourisme, SETRA, LCPC, 1994.
- SETRA-LCPC (1998) Réseau routier national, Catalogue des structures type de chaussées neuves, Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, SETRA, LCPC, 1998.
- SETRA-LCPC (2000) Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique. Fascicules I et II. Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, SETRA, LCPC, 2000.

FISSUROUTE

- Caron, J.F., Diaz Diaz A., Carreira, R.P. Chabot, A. et Ehrlacher A. « Multiparticulate modelling for the prediction of delamination in multi-layered materials » Composite Sciences and Technology, 66(6), 755-765.
- Chabot A. (2007) « Synthèse des travaux de recherche de Pierre Lavigne » Rapport de fin de contrat. Cimbéton
- Chabot A. 2004, Modèle fissuroute. *Rapport Général des Activités du LCPC*, programme Durabilité, entretien, réparation et adaptation des infrastructures , page 53.
- Chabot A., Tamagny P., Tran Q. D., Ehrlacher A, 2004, " Modeling of stresses for cracking in pavements ". *5th International CROW-workshop*, 31 mars-2 April, Istanbul, Turkey.
- Chabot A., Tran Q. D., Ehrlacher A. 2005, A simplified modeling for cracked pavements - Modèle simplifié pour le calcul des chaussées. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées*, (258-259), 105-120.
- Chabot A., Tran Q. D., Pouteau B., 2004, "Simplified modeling of a cracked composite pavement", *First International Conference on Failure Analysis*, 12-14 juillet, Lisbonne, Portugal.
- Chabot, A., Pouteau, B., Balay, J.M., De Larrard, F. (2008) « Fabac Accelerated Loading Test of Bound Bitumen Cement Overlay and Asphalt Layers » Sixth International Rilem Conf. on Cracking in Pavements, June 16-18, Chicago, U.S.
- Chabot, A., Tran Q. D., Ehrlacher A., 2007, "A modeling to understand where a vertical crak can propagate in pavements". *International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials,* 20- 22 June, Athens, Greece. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44882-6, **1**, 431-440.
- Guillo C. 2004, "Validations par éléments finis d'un modèle simplifié pour l'étude de décollement à l'interface d'un multicouche de chaussée". *Rapport de stage de DESS de l'Université de Nantes.*
- Le Corvec, M. (2008) « Simulation des effets du retrait de béton de ciment sur la flexion de bicouches de chaussées fissurées » Stage de Master en analyse numérique 2e année de l'Université de Nantes.
- Pouteau, B., Chabot. A., De Larard F., (2002) « Etude en laboratoire du collage béton/matériaux bitumineux » Matériaux 2002, 21-25, octobre, Tours.
- Spillman, N. (2007) « Analyse des contraintes de l'essai Méfisto à l'aide du M4-5n » Stage de Master en analyse numérique 2e année de l'Université de Nantes.
- Tran Q. D., Chabot A., Ehrlacher A., Tamagny P., 2003, "Modèle simplifié pour le calcul de chaussées". 16ème *Congrès Français de Mécanique*, 1-3 Septembre, Nice.
- Tran Q. D., Chabot A., Ehrlacher A., Tamagny P., 2004, "A simplified modeling for cracking in pavements". *Proceedings of the Fifth International RILEM Conference Cracking in Pavements*, May 5-8 , Limoges, France, 299-306.
- Tran. Q. D. (30 septembre 2004), "Modèle simplifié pour les chaussées fissurées multicouches". *Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.*

FISSUROUTE – DOCUMENTS NON-DISPONIBLES

- Pouteau B., Guillo C., Chabot A., 2004. Logiciel de calcul de bicouche délaminé. Programmation sous MATLAB.
- Spilman N., Chabot A. 2007. Calcul des contraintes proches des fissures de l'essai Mefisto symétrique, programmation SCILAB.
- Tran Q. D., Chabot A., Guillo C., Ehrlacher A. 2004, « Fissuroute-v1 », logiciel de calcul de chaussées bicouches fissurée verticalement dans l'épaisseur de la 1ère couche. Programmation sous MATLAB.

MODÉLISATION DE LA FATIGUE

- Bodin D. (2002) « Modèle d'endommagement cyclique: Application à la fatigue des enrobes bitumineux" Thèse de Doctorat, École centrale de Nantes et Université de Nantes.
- Bodin D., A. Chabot, C. de La Roche et G. Pijaudier-Cabot (2003) « Une nouvelle loi pour l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux » 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, 1-5 septembre 2003.
- Bodin D., G. Pijaudier-Cabot, C. de La Roche, J.-M. Piau et A. Chabot (2004) « Continuum Damage Approach to Asphalt Concrete Fatigue Modeling » Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Juin 2004. pp. 700-708.
- Bodin, D., de La Roche, C., Piau, J. M., and Pijaudier-Cabot, G. (2003) ''Prediction of the Intrinsic damage during bituminous mixes fatigue tests.'' Int. RILEM Symp. on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials.
- Bodin, D., Pijaudier-Cabot, G., de La Roche, C. and Chabot, A. (2002) ''A continuum damage approach of asphalt concrete fatigue tests'' Proc., 15th ASCE Engineering Mechanics Conf., Reston, Va.
- Breysse, D., de La Roche, C., Chauvin, J.-J., and Domec, V. (2002) ''Fatigue tests on bituminous composites: Balance between damage and recovering.'' Proc., 15th ASCE Engineering Mechanics Conf., Reston, Va.

MODÉLISATION DES DÉFORMATIONS PERMANENTES

- Voir la bibliographie de CESAR-ORNI.

MODÉLISATION NON-LINÉAIRE

- Guezouli, S. (1994) « Comportement des chaussées souples : Modélisation et simulation numérique » Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Coulibaly, L. (1998) « Etude du comportement réversible des graves non traitées : application aux chaussées souples » Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Civil de Nantes-Saint Nazaire, Université de Nantes.

- Voir aussi la bibliographie de CVCR

MODÉLISATION VISCOÉLASTIQUE

- De La Roche Saint André, C. (1996) « Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux-Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyses » Thèse de docteur, Ecole Centrale de Paris.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C., Piau, J.-M. (2005) « Matériaux Routiers Bitumineux » Volume 2, chapitre Propriétés et thermomécaniques des mélanges bitumineux, 107-108, Hermes Sciences Publications.
- Huet, C. (1963) « Etude par une méthode d'indépendance du comportement viscoélastique des matériaux Hydrocarbonés » Thèse de docteur-ingénieur, Faculté de Sciences de Paris.
- Huet, C. (1999) « *Coupled size and boundary-condition effects in viscoelastic heterogeneous and composite bodies* » Mechanics of Materials, Volume 31, Elsevier, 781-829.
- Sayegh G. (1963) « Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux » Conférence au Groupe Français de Rhéologie, 51-74.
- Sayegh G. (1965) « Contribution à l'étude des propriétés visco-élastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux » Thèse de docteur-ingénieur, Sorbonne, France.

- Voir aussi les bibliographies de PREDICTA, VISCOANALYSE, VISCOROUTE et CESAR-CVCR.

PREDICTA

- ALAM, S. Y. et F. Hammoum (2007) « Détermination des propriétés mécaniques d'enrobés bitumineux à partir des caractéristiques des constituants » Rapport de stage Master, Université de Marne-la Vallée, LCPC.
- Hammoum F. « L'enrobé bitumineux à l'échelle granulaire: observations et caractérisation en volume »
- Hammoum F. et C. de la Roche « Prédiction des modules effectifs des Enrobes bitumineux »
- Hammoum F., C. de la Roche et C. Boutin « Prédiction du module complexe de l'enrobé : passage micro-macro »

VISCOANALYSE

- E. Chailleux « Note d'utilisation de l'application logicielle visco-analyse », outil disponible sur internet à www.lcpc.fr/fr/produits/viscoanalyse/index.dml, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, 1er juin 2007
- E. Chailleux, C. Such, G. Ramond and C. de La Roche. « A mathematical-based master curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials » Road Material and Pavement Design, 7 Special Issue, 2006.
- Voir aussi la bibliographie de MODELISATION VISCOELASTIQUE.

VISCOROUTE

- Chabot A., Piau J. M. (2001) « Calcul semi-analytique d'un massif viscoélastique soumis à une charge roulante rectangulaire. », poster, 1ère Conférence Internationale Albert Caquot, 3-5 Octobre, Paris.
- Chabot A., Tamagny P., Duhamel D., Poché D., (2006) « Visco-elastic modeling for asphalt pavements – software ViscoRoute » 10th International Conference on Asphalt Pavements, 12-17 August, Québec, Canada.
- Duhamel D., Chabot A., Tamagny P., Harfouche L., (2005) « Viscoroute: Visco-elastic modeling for asphalt pavements - Viscoroute : Modélisation des chaussées bitumineuses. » Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées, (258-259), 89-103.
- Duhamel, D., V. H. Nguyen, A.Chabot, P.Tamagny, (2003a) « Modélisation de chaussées viscoélastiques », 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, France, 1-3 Septembre 2003.
- Duhamel, D., V. H. Nguyen, A.Chabot, P.Tamagny (2003b) « Modelling of multilayer viscoelastic road structures under moving loads » 9th International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Amsterdam, Netherlands, 2-4 Septembre 2003.
- LCPC (2007) « Guide d'utilisation ViscoRoute-v1 »
- Nguyen V.H. (2002) « Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles » thèse de doctorat, ENPC, France.
- Voir aussi la bibliographie de MODELISATION VISCOELASTIQUE.

VISCOROUTE - DOCUMENTS INTERNES

- Lohf, A. (2005), « Evaluation de ViscoRoute V1 pour l'étude de quelques chaussées souples », Rapport de stage de 5ème année de l'université de Dresde, option « Chaussées et aménagement des villes », LCPC, Sept.-Déc. 2005.
- Poché D. (2005) « Validation et premières applications de Viscoroute à l'étude des chaussées souples ». Stage de MASTER PRO (2ème année) analyse numérique de l'Université de Nantes, février-juin 2005
- Senti A., Chabot A., 2007. Post-traitement Shannon des courbes Viscoroute-v1 (diffusable), programmation SCILAB.
- Senti, A. (2007) « Application et développement du logiciel ViscoRoute-v2 pour l'étude des

multicharges sur chaussées bitumineuses » Rapport de stage de Master 2 Génie mécanique, LCPC, Université d'Evry.

VISCOROUTE - DOCUMENTS NON DISPONIBLES

- Chabot A. (2000) « Introduction de la viscoélasticité dans un modèle de multicouche de chaussée ». Rapport de recherche de DMSC/CCGR (LCPC), mars 2000.
- Duhamel D., Chabot A., Harfouche L., Tamagny P. (2004), « Viscoroute-v1 », logiciel de calcul de chaussées viscoélastiques. Programmation en C++ et interface en Visual Basic.
- Letribroche E. (2001) « Analyse semi-analytique des champs de contraintes dans une chaussée élastique soumise à une charge roulante. Application vers la viscoélasticité » Stage de maîtrise de mécanique de l'Université Nantes.
- Leventic P. (2002) « Charge harmonique mobile sur un demi-espace thermo-visco-élastique stratifié (Le modèle Huet & Sayegh ». Rapport de stage de DEA Dynamique des structures et Systèmes Couplés de ENPC/Université Marne la Vallée.
- Nuyen T, Duhamel D., Chabot A., Tamagny P. (2006), « Viscoroute-v2 », logiciel de calcul de chaussées viscoélastiques. Programmation en C++ et interface en Python.

ANNEXE

Fiches de présentation des logiciels

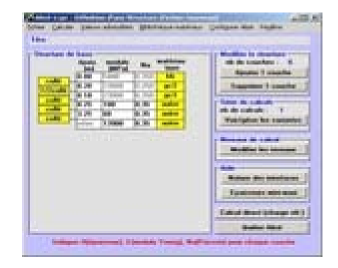


Alizé-LCPC Routes

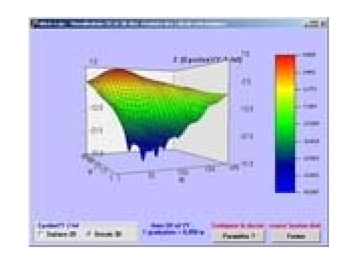
Logiciel de calcul des sollicitations créées par le trafic dans les structures de chaussées, et d'aide au dimensionnement des chaussées selon la méthode rationnelle LCPC-SETRA

Objet et fonctionnalités du logiciel

Le logiciel ALIZE-LCPC est le programme de référence utilisé pour les calculs de dimensionnement des chaussées en France. Il permet de réaliser les calculs des sollicitations créées par le trafic dans ces structures, calculs indispensables à la mise en œuvre de la méthode française de dimensionnement rationnel des chaussées neuves et des renforcements, élaborée par le LCPC et le SETRA dès la fin des années 70. Le noyau théorique du programme repose sur la solution au problème du multicouche élastique linéaire isotrope, proposée par D. Burmister.

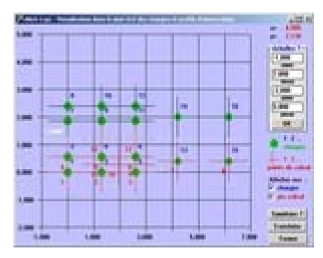


Structure de chaussée



Résultats des calculs

Exemple εzz sol, carte 3D



Chargement de type spécial

ALIZE-LCPC Routes est la version moderne du logiciel, développée par le LCPC pour fonctionner sous les environnements Windows de Microsoft Corporation. Cette nouvelle version s'organise autour d'une interface homme-machine qui rend en particulier très fonctionnelles et conviviales les opérations de saisie des données et de présentation des résultats de calcul. Son ergonomie et les nombreux menus d'aide qu'il comporte, la rendent particulièrement adaptée à l'étude de projets en bureau d'études, et également a des actions de recherche et d'enseignement.

Le logiciel permet la simulation et le dimensionnement des structures routières et autoroutières, et il s'applique également aux chaussées spéciales (comme celles réservées à la circulation de véhicules exceptionnels, d'engins industriels ou portuaires), aux chaussées aéronautiques, etc. ALIZE-LCPC Routes intègrera (premier semestre 2005) le module Gel1d-Routes pour la vérification au gel-dégel des chaussées selon la démarche complète LCPC-SETRA .

Le logiciel propose, en particulier, les possibilités suivantes :

- Saisie-gestion simple et fonctionnelle des données pour les calculs : structures de chaussée, chargements (simples, multi-roues, multi essieux ou bogies, …), conditions thermiques pour les vérifications au gel-dégel.
- Module de calcul des valeurs de sollicitations admissibles.
- Bibliothèque des matériaux de chaussées conformes aux normes routières, et bibliothèque personnalisée de matériaux.
- Enchaînement automatique des variantes de structures (variations des épaisseurs ou des modules des couches).
- Visualisation possible des résultats de calcul suivant des profils ou des cartes tri-dimensionnelle.
- Rappels des hypothèses et des spécifications de la méthode rationnelle de dimensionnement LCPC-SETRA : classes et agressivité du trafic, choix des risques de calcul, épaisseurs de mise en oeuvre minimales et maximales des matériaux, choix du type d'interface entre couches, choix et épaisseur des couches de surface, ...
- Rappels des dimensionnements des structures types du Catalogue 1998 des Chaussées du réseau national.
- Rappel des hypothèses et des spécifications de la méthode de vérification au gel-dégel des chaussées LCPC-SETRA.
- Aide en ligne détaillée pour une prise en main accélérée et une utilisation optimisée du logiciel.

Distribution du logiciel

Le LCPC a confié la diffusion d'ALIZE-LCPC Routes à la société ITECH, qui a la responsabilité d'éditer, de promouvoir et de vendre le logiciel.

Si vous souhaitez d'autres informations sur ALIZE-LCPC Routes et ses modalités d'utilisations:

Contacter :

Le **responsable**
de ce logiciel au LCPC

Le distributeur :
Société ITECH

Références bibliographiques

- Guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussées, LCPC-SETRA 1994
- *Pavement design, a rational approach, European Roads Review, Special issue 1, 2003*


Téléchargez la présentation du logiciel





Le progiciel CESAR-LCPC

A voir aussi...

- Le progiciel CESAR-LCPC
- Les logiciels CLEO2D et CLEO3D
- Le solveur CESAR
- Les programmes utilitaires
- Développement du progiciel
- La bibliothèque des jeux de données

Présentation générale

La modélisation en Génie civil aide l'ingénieur à comprendre et maîtriser des phénomènes complexes (modèles explicatifs), à concevoir et à dimensionner ses ouvrages (modèles prédictifs apportant une aide à la décision). Elle s'appuie sur l'analyse des phénomènes et leur représentation physico-mathématique, sur la résolution numérique des équations correspondantes et sur la confrontation avec l'expérience. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) s'est engagé dans ce domaine à la fin des années 1960 et, depuis une vingtaine d'années, il capitalise son effort de modélisation par le développement du progiciel CESAR-LCPC.

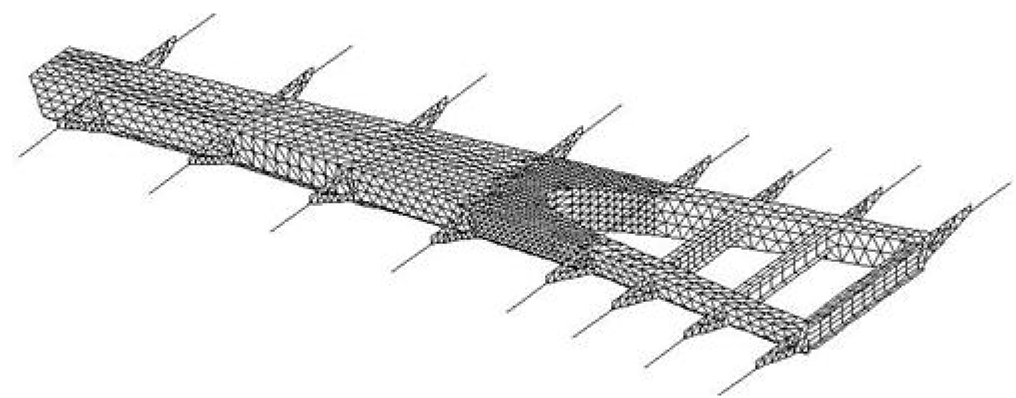


Figure 1 - Exemple de modélisation : Passerelle pour piéton (demi-ouvrage). *Crédit : PFE ENPC, 1997*

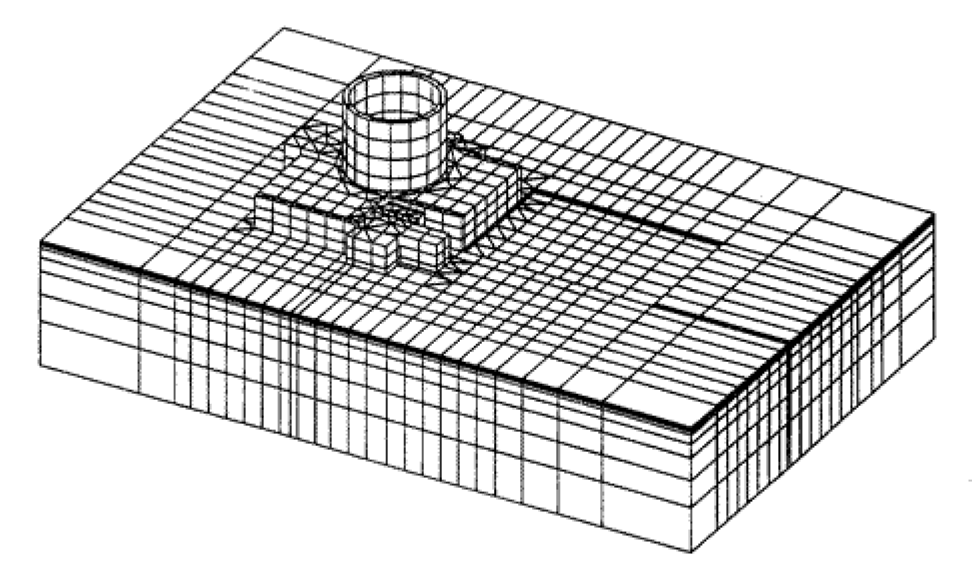


Figure 2 - Exemple de modélisation : Centrale nucléaire et sa fondation *Crédit : LCPC pour EDF*

CESAR-LCPC est un progiciel général de calcul fondé sur la méthode des éléments finis et adapté à la résolution des problèmes du Génie civil et de l'Environnement : calcul de structures, mécanique des sols et des roches, thermique, hydrogéologie, etc.

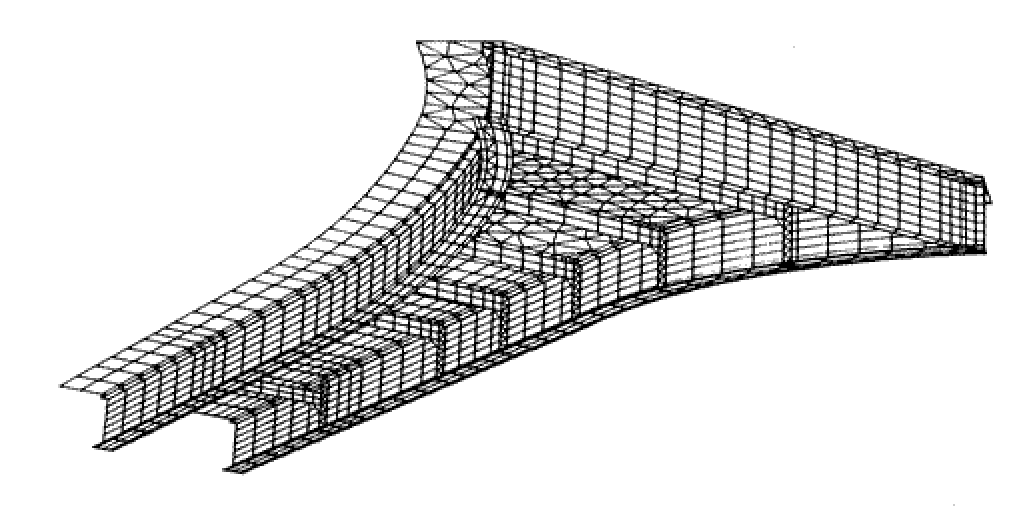


Figure 3 - Exemple de modélisation : Pont Mirabeau sur la Durance *Crédit : LCPC pour DDE 13*

Le développement de CESAR-LCPC a débuté au début des années 1980 et ce progiciel a définitivement succédé au système ROSALIE (développé au LCPC de 1968 à 1983) lorsqu'a commencé la diffusion de la version 2.0, à partir de 1986. CESAR-LCPC est un progiciel en constante évolution car il est un outil de recherche et de développement propre au Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) et à ses partenaires. C'est également un progiciel à vocation industrielle, et la version Standard est utilisée dans le Réseau scientifique et technique du Ministère chargé de l'Équipement (France) et dans de nombreux bureaux d'études. Sa dernière évolution a eu pour objectif d'en faire un produit parfaitement industrialisé, à l'ergonomie conforme à l'état de l'art, et aux fonctionnalités renforcées en pré- et en post-traitement. Réalisée en collaboration avec les sociétés Simulog (gestion de projet, assurance de la qualité) et Itech (développement des nouveaux logiciels de pré- et de post-traitement, la nouvelle version 4.0 est disponible depuis janvier 2003.

CESAR-LCPC désigne l'ensemble formé par les logiciels de pré- et de post-traitement **CLEO2D** et **CLEO3D** (respectivement pour les modélisations bi ou tridimensionnelles), par le solveur fondé sur la méthode des éléments finis **CESAR**, et par les programmes utilitaires. Ces différents programmes communiquent entre eux par l'intermédiaire d'une base de données (Figure 4).

Réaliser une modélisation avec CESAR-LCPC se traduit en général par l'enchaînement des étapes suivantes :

a. utilisation des fonctionnalités de pré-traitement de CLEO2D ou CLEO3D pour la génération des données du solveur CESAR (maillage et jeu de données) ;
b. lancement du solveur par éléments finis CESAR pour effectuer la résolution numérique du problème étudié ;
c. utilisation des fonctionnalités de post-traitement de CLEO2D ou CLEO3D pour l'interprétation des résultats.

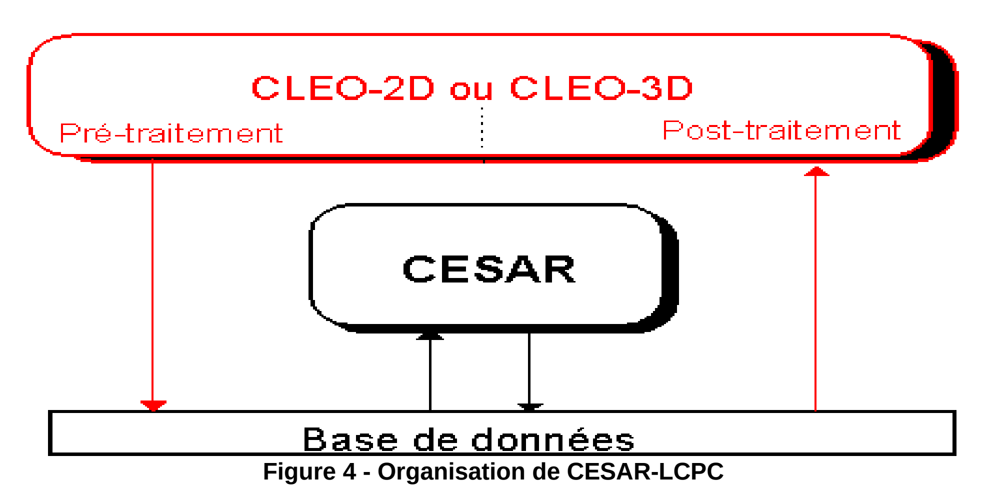


Figure 4 - Organisation de CESAR-LCPC

Des programmes utilitaires peuvent éventuellement intervenir entre ces différentes étapes, par exemple pour la mise en données de modélisations numériques particulières, ou pour aider à l'interprétation des résultats du calcul.

Les constituants du progiciel

La nomenclature complète des constituants de la version 4.0 de CESAR-LCPC est l'objet d'un document intitulé "Fiche de version". Les

présentes pages s'attachent plus particulièrement à décrire les principaux constituants qui sont :

- l'ensemble de programmes ;
- la documentation ;
- un ensemble de jeux de données.

Les différents programmes sont organisés en modules réalisant chacun une fonction bien déterminée. Cette organisation, choisie dès l'origine du progiciel, facilite la maintenance, la portabilité et l'introduction de nouvelles possibilités. Cela permet également la diffusion de CESAR-LCPC de façon modulaire, selon le choix du client.



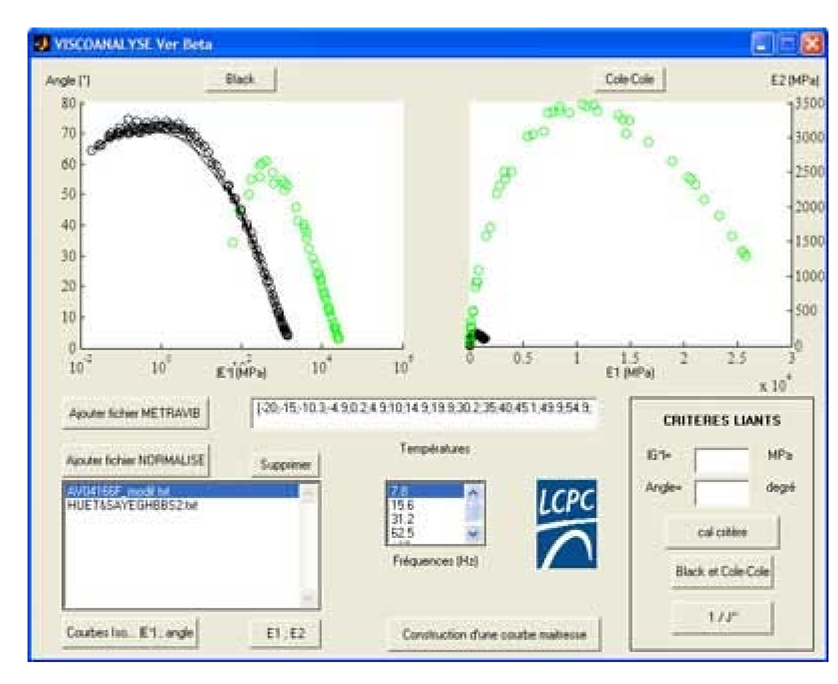
Accueil > Produits >Viscoanalyse

Viscoanalyse

Viscoanalyse est un outil qui permet de visualiser des mesures de module complexe, d'interpréter des données en terme de température d'isomodule et d'isoangle, de construire des courbes maîtresses et finalement de calibrer des modèles analogiques (Huet, Huet-Sayegh, 2S2P1D). Il s'applique aussi bien aux liants bitumineux qu'aux enrobés.

Pour fonctionner, il est nécessaire de lui fournir des mesures de la norme du module complexe |E*| ainsi que de l'angle de phase δ. Ces paramètres devront être mesurés pour plusieurs températures et plusieurs fréquences. Pour chaque isotherme, les fréquences de mesure devront être identiques et classées dans le même ordre.

Viscoanalyse permet de déterminer les paramètres de la loi viscoélastique de Huet-Sayegh pour les enrobés. Cette loi est utilisée dans les logiciels de calcul de structures VISCOROUTE (calcul de structures 3D de chaussées à comportement élastique et viscoélastique) et CVCR (module de César qui permet de modéliser le comportement 3D de chaussée sous charge roulante). Viscoanalyse est donc un outil pour déterminer les paramètres d'entrée de ces logiciels



Fenêtre principale de Viscoanalyse

Formulaire de demande de logiciel

Nom * :

Prénom * :

Société *

Fonction :

Domaine d'activité / Discipline

Courriel * :

ATTENTION : Si votre adresse électronique n'est pas correctement écrite ci-dessus, nous ne pourrons vous répondre ...

Adresse :

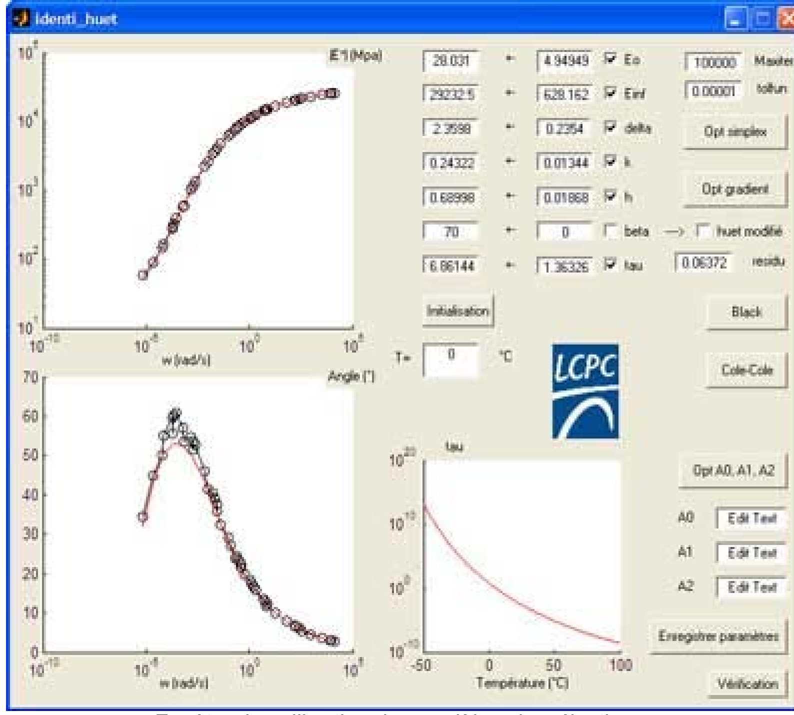
Code postal :

Ville :

Pays :

Téléphone :

Commentaire :



Fenêtre de calibration des modèles viscoélastiques